

Mémoire

Auteur : Maillen, Caty

Promoteur(s) : Degré, Aurore; Michez, Adrien

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/25035>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

**CARACTÉRISATION DES HAIES DANS LES
PAYSAGES AGRICOLES : TYPOLOGIE,
PARAMÈTRES PÉDOLOGIQUES ET VÉGÉTATIFS
POUR UNE MODÉLISATION HYDROLOGIQUE
AFFINÉE**

CATY MAILLEN

**MEMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT, À FINALITÉ SPECIALISÉE**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2024-2025

RÉDIGÉ SOUS LA DIRECTION DU PR. AURORE DEGRÉ

COPROMOTION : ADRIEN MICHEZ

**COMITÉ DE LECTURE :
BERNARD TYCHON
CAMILLE WEZEL**

Copyright

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de l'Université de Liège.

*L'autorité académique est représentée par le(s) (co-)promoteur(s), membre(s) du personnel enseignant de l'Université de Liège.

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : MAILLEN Caty,
caty.maillen@gmail.com.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier ma promotrice, Aurore Degré, pour m'avoir fait confiance et guidée dans cette aventure qu'a été la rédaction de ce mémoire. J'ai vu dans vos yeux les étincelles propres aux chercheurs, toujours avides de connaissances et capables, en même temps, d'encadrer finement des équipes en distillant confiance et bienveillance. Merci infiniment pour cette rencontre.

Merci à mes professeurs arlonais pour leur enseignement et leur suivi pendant ces deux années, ainsi qu'à toute l'équipe du campus d'Arlon pour nos moments de convivialité.

Merci à la fine équipe gembloutoise, Camille et Lisa, pour vos sourires et votre soutien ces quatre derniers mois.

Merci à mes jeunes collègues du master d'Arlon qui ont fait de ces deux années une aventure riche en partage et en émotions.

Merci à mes deux compères : Antoine, l'urgentiste apiculteur dit « l'activiste », et Nico, l'informaticien clarinettiste dit « le sociologue ». Merci les amis pour tous ces merveilleux moments partagés, pour nos débats, nos remises en question, et surtout pour votre soutien infailible tout au long de ces deux années d'aventures.

Merci à mes indispensables, Dominique, Viviane et Frédéric, pour votre présence, vos conseils et votre bienveillance. Merci pour les ravitaillements et les relectures. Merci d'être là au quotidien.

Et enfin, merci à mes deux chers enfants pour m'avoir soutenue pendant ces deux années de Master. Merci Antony pour tes « hamburgers maison » et merci ma Lyne pour ces moments « Netflix » partagés entre filles, ô combien indispensables. Je vous souhaite à tous les deux un parcours universitaire aussi riche que le mien...

Abstract

European agricultural landscapes are increasingly exposed to episodes of runoff and erosion, aggravated by the progressive disappearance of hedgerows. These linear structures are today considered as nature-based solutions likely to regulate water flows at the scale of watersheds. This master's thesis aims to characterize the hydrological role of hedgerows through the analysis of their typology and their key parameters (LAI, Ks, porosity, surface roughness, root distribution), in order to refine their representation in the distributed hydrological model MIKE SHE. Two main hypotheses guided this work: the first maintains that hedgerows contribute to hydrological regulation through infiltration and evapotranspiration, the second states that their effectiveness varies according to their typology and pedological characteristics. The analysis relied on an in-depth bibliographic review and the development of a cross-tabulated table synthesizing the data available in temperate European climates. The main hydrological parameters of hedgerows subsidized in the Wallonia Region were compared with those of neighboring land covers (crops, grasslands, grassy strips). LAI values indicate a strong evapotranspiration capacity of hedgerows compared to isolated trees. Manning's coefficients highlight their effectiveness as a hydraulic barrier, particularly for live hedges and miscanthus. Measurements of Ks and water content at saturation indicate an improvement of infiltration and porosity in the vicinity of hedgerows. However, root depth and root distribution remain difficult to compare, due to the lack of standardized methodologies. Finally, the characterization of hedgerow typologies remains difficult to establish, some categories being poorly documented. This work confirms the positive hydrological role of hedgerows but underlines the lack of standardized quantitative data, which contrasts with their promotion in public policies. It emphasizes the need for a harmonization of hedgerow typologies, a strengthening of field studies, and a reflection on their spatial representation in distributed models.

Résumé

Les paysages agricoles européens sont de plus en plus exposés aux épisodes de ruissellement et d'érosion, aggravés par la disparition progressive des haies. Ces structures linéaires sont aujourd'hui considérées comme des solutions basées sur la nature et susceptibles de réguler les flux hydriques à l'échelle des bassins versants. Ce mémoire a pour objectif de caractériser le rôle hydrologique des haies à travers l'analyse de leur typologie et de leurs paramètres clés (LAI, Ks, porosité, rugosité de surface, distribution racinaire), afin d'affiner leur représentation dans le modèle hydrologique distribué MIKE SHE. Deux hypothèses principales ont guidé ce travail : la première soutient que les haies contribuent à la régulation hydrologique par l'infiltration et l'évapotranspiration, la seconde énonce que leur efficacité varie selon leur typologie et les caractéristiques pédologiques. L'analyse s'est appuyée sur une revue bibliographique approfondie et l'élaboration d'un tableau croisé synthétisant les données disponibles en climat tempéré européen. Les principaux paramètres hydrologiques des haies subventionnées en Région wallonne ont été comparés à ceux de couverts voisins (cultures, prairies, bandes enherbées). Les valeurs de LAI indiquent une forte capacité évapotranspirante des haies par rapport aux arbres isolés. Les coefficients de Manning mettent en évidence leur efficacité comme frein hydraulique, notamment pour les haies vives et le miscanthus. Les mesures de Ks et de teneur en eau à saturation indiquent une amélioration de l'infiltration et de la porosité au voisinage des haies. Toutefois, la profondeur et la distribution racinaire demeurent difficilement comparables, faute de méthodologies standardisées. Enfin, la caractérisation des typologies de haies reste difficile à établir, certaines catégories étant peu documentées. Ce travail confirme le rôle hydrologique positif des haies mais souligne le manque de données quantitatives standardisées, ce qui contraste avec leur valorisation dans les politiques publiques. Il souligne la nécessité d'une clarification des typologies de haies en fonction des rôles qu'on entend leur faire jouer, d'un renforcement des études de terrain et d'une réflexion sur leur représentation spatiale dans les modèles distribués.

TABLE des matières

1	Introduction	12
1.1	Contexte	12
1.1.1	Les extrêmes hydrologiques en Europe et en Belgique	12
1.1.2	Les solutions basées sur la nature (NBS)	16
1.1.3	Actions politiques.....	17
1.2	Problématique.....	19
1.3	Objectif.....	19
1.3.1	Sujet du mémoire	19
1.3.2	Hypothèses et Méthodologie.....	20
2	Revue bibliographique.....	22
2.1	Quels sont les différents types de haies existantes ?	22
2.1.1	Typologie.....	22
2.1.2	Densité, structure.....	30
2.1.3	Association	30
2.1.4	Positionnement et orientation.....	32
2.1.5	Différentes fonctions remplies par ces barrières végétales.....	35
2.2	Quelles sont les haies subventionnées en région Wallonne ?	41
2.2.1	Les cinq types de haies subventionnées	41
2.2.2	Aides pour les mesures agroenvironnementales et climatiques (MAEC)	42
	Analyse des types de haies et classification selon une clé de lecture hydrologique.....	45
2.3	Les différents rôles d'une haie du point de vue hydrologique	45
2.3.1	Interception des pluies	45
2.3.2	Infiltration de l'eau dans le sol.....	46
2.3.3	Frein hydraulique	48
2.3.4	Dépôt de sédiments	48
2.4	Fonctionnement hydrologique d'une haie.....	50
2.4.1	Schématisation	50
2.4.2	Caractéristiques physiques du sol.....	51
2.4.3	Caractéristiques hydrologiques	56
2.5	Outils de modélisation hydrologique.....	68
2.5.1	Tour d'horizon des modèles existants.....	68
2.5.2	Le modèle : MIKE SHE.....	70
3	Matériels et méthodes	72
3.1	Tableau des différentes barrières végétales à implémenter dans le modèle MIKE SHE.....	72
3.2	Indicateurs clés pour le paramétrage.....	73
3.2.1	Représentation de la végétation.....	73
3.2.2	Représentation de la surface.....	76
3.2.3	Représentation de la partie souterraine	77

3.2.4	Construction du tableau croisé	82
4	<i>Résultats</i>	83
4.1	Paramètres clés	83
4.1.1	L'indice foliaire (LAI).....	83
4.1.2	Coefficient de Manning	85
4.1.3	Densité racinaire.....	86
4.1.4	Profondeur racinaire	89
4.1.5	Masse volumique apparente	89
4.1.6	Conductivité hydraulique à saturation (Ks).....	93
4.2	Tableau croisé des indicateurs en fonction des différents types de barrières végétales	100
5	<i>Discussion des résultats</i>	104
6	<i>Conclusion et perspectives</i>	112
7	<i>Bibliographie</i>	113
8	<i>Annexes</i>	119

TABLE des figures

FIGURE 1 : COMPARAISON DES PRÉCIPITATIONS, TEMPÉRATURES ET INSOLATION À UCCLE AU MOIS DE MARS PAR RAPPORT À LA NORMALE 1991 À 2020 (IRM, 2025)	14
FIGURE 2 : HAIE ARBUSTIVE TAILLÉE (AFAC-AGROFORESTERIES, 2019).....	23
FIGURE 3 : TAILLIS LINÉAIRE DE NOISETIERS AVANT ET APRÈS RECÉPAGE (AFAC-AGROFORESTERIES, 2019)	23
FIGURE 4 : HAIE DE CHARMES RÉCEMMENT PLESSÉE (AFAC-AGROFORESTERIES, 2019)	24
FIGURE 5 : HAIES VIVES ET CHAMPÊTRES MULTI- STRATES (AFAC-AGROFORESTERIES, 2019).....	25
FIGURE 6 : MAILLAGE BOCAGER ASSURANT LA LIAISON ENTRE L’INTÉRIEUR DES TERRES ET LA RIVIÈRE GRÂCE AUX HAIES RIPISYLVES (PAYSAN BRETON, 2025)	25
FIGURE 7 : HAIE RIPISYLVE LE LONG DE LA VESDRE (CONTRAT DE RIVIÈRE VESDRE, S. D.-A)	26
FIGURE 8 : HAIES ARBORÉES AVEC ARBRES TÊTARDS (BAUER & DAVIN, 2013).....	26
FIGURE 9 : ALIGNEMENT D’ARBRES DE HAUT-JET (GILLAIN ET AL., 2021).....	27
FIGURE 10 : ALIGNEMENT DE FRÈNES TÊTARDS (AFAC-AGROFORESTERIES, 2019).....	27
FIGURE 11 : PARCELLE DE MISCANTHUS ÂGÉ D’UN AN (VALBIOM, 2016).....	29
FIGURE 12 : ORGANISATION ARCHITECTURALE EN 3 ÉTAGES D’UNE HAIE VIVE (BAUER & DAVIN, 2013).	30
FIGURE 13 : EXEMPLE DE MISE EN PLACE ET ILLUSTRATION D’UNE ASSOCIATION FASCINE, HAIE ET BANDE ENHERBÉE (OUVRY ET AL., 2012).....	31
FIGURE 14 : ILLUSTRATION DE PLANTATION D’UNE HAIE DENSE EN TROIS RANGS, PROTÉGÉE EN AMONT PAR UNE FASCINE. LA FLÈCHE BLEUE REPRÉSENTE LE SENS DU RUISSELLEMENT (GISER, 2023)	31
FIGURE 15 : ASSOCIATION D’UNE HAIE PLANTÉE SUR TALUS ET D’UN FOSSE D’INFILTRATION (OUVRY ET AL., 2012).....	31
FIGURE 16 : ASSOCIATION ENTRE DIVERSES ZONES TAMPONS : HAIES ARBORÉES SUR TALUS ET CHENAL (VIAUD & THOMAS, 2019).....	32
FIGURE 17 : LOCALISATION STRATÉGIQUE DES HAIES ET FASCINES POUR LIMITER LE TRANSFERT DES EAUX DE RUISSELLEMENT (OUVRY ET AL., 2012; RICHEL ET AL., 2019).....	33
FIGURE 18 : SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES RENDUS PAR UNE HAIE (PARC NATUREL RÉGIONAL DU VERDON, 2024).....	36
FIGURE 19 : SYNTHÈSE DES FLUX D’EAU D’APRÈS DIFFÉRENTES SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES (BANSEPT, 2013)	46
FIGURE 20 : PRINCIPAUX TYPES D’EAU DU SOL EN FONCTION DE LA POROSITÉ, DE L’ACCESSIBILITÉ BIOLOGIQUE, DE LA RÉTENTION ET DU TYPE D’HUMIDITÉ (RIDREMONT ET AL., 2012).....	47
FIGURE 21 : ORGANISATION DES HORIZONS DE SOL LE LONG D’UN VERSANT PRÉSENTANT UNE HAIE DANS LE MASSIF ARMORICAIN (WALTER ET AL. (2003) CITÉ PAR VIAUD ET AL., (2009).....	49
FIGURE 22 : ILLUSTRATION DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE D’UN SYSTÈME AGROFORESTIER. LES ENCADRÉS VERTS REPRÉSENTENT LES PROPRIÉTÉS DE LA STRUCTURE ARBORÉE QUI INFLUENCENT LES FLUX D’EAU. LEURS EFFETS SONT INDIQUÉS PAR DES FLÈCHES NOIRES. LES FLÈCHES ROUGES ET BLEUES INDIQUENT LA DIRECTION DES FLUX HYDRIQUES (COMPOSANTES DU BILAN), LA COULEUR TRADUISANT UNE AUGMENTATION (ROUGE) OU UNE RÉDUCTION (BLEU) PAR RAPPORT À UNE CULTURE CLASSIQUE (JACOBS ET AL., 2022).....	50
FIGURE 23 : TRIANGLE TEXTURAL DU SOL REPRÉSENTANT LES POURCENTAGES D’ARGILE, DE LIMON ET DE SABLE POUR LES 12 CLASSES TEXTURALES DE BASE (USDA, 2017).	51
FIGURE 24 : ILLUSTRATION DU REMPLISSAGE EN EAU DU SOL EN FONCTION DE LA POROSITÉ ET DÉFINITION DE LA RÉSERVE UTILE (AMELINE, 2019).	53
FIGURE 25 : RÉPARTITION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE AU SEIN D’UN PROFIL DE SOL (DUCHÈNE, 2019).....	56
FIGURE 26 : TYPES D’ÉVAPOTRANSPIRATION SELON LA FAO 56 (ALLEN ET AL., 1998) ADAPTÉ PAR BENHADJ (2009). ...	58
FIGURE 27 : EXEMPLE D’AMÉNAGEMENT PAYSAGER (KEYLINE DESIGN) OÙ LES HAIES ET BANDES VÉGÉTATIVES AUGMENTENT LA RUGOSITÉ DE SURFACE, RÉDUISENT LE RUISSELLEMENT ET FAVORISENT L’INFILTRATION DE L’EAU (PERMALAB, S. D.).....	60
FIGURE 28 : COURBES DE RÉTENTION EN EAU POUR DIFFÉRENTS TYPES DE SOL (SABLEUX, LIMONEUX, ARGILEUX). LA RÉSERVE UTILE EST DÉFINIE PAR LA ZONE ENTRE LA CAPACITÉ AU CHAMP (FC) ET LE POINT DE FLÉTRISSEMENT (WP) ET REPRÉSENTE L’EAU DISPONIBLE POUR LES PLANTES. (FAO, S. D.).....	61

FIGURE 29 : COURBES DE CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE (K) POUR DES SOLS GROSSIERS (TRAIT PLEIN), MOYENS (TIRETS) ET FINS (POINTILLÉS), EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU À GAUCHE ET DU POTENTIEL MATRICIEL À DROITE. ADAPTÉ DE VAN GENUCHTEN (1980).	62
FIGURE 30 : ILLUSTRATION DE TYPOLOGIES RACINAIRES (OSBORN, 2020)	64
FIGURE 31 : ILLUSTRATION DE SYSTÈMES RACINAIRES POUR DES ESPÈCES LIGNEUSES (SUPPORT PÉDAGOGIQUE).....	65
FIGURE 32 : EXEMPLE D'ORGANISATION SPATIALE DU SYSTÈME RACINAIRE D'UN ARBRE ADULTE (ROTH, 2022).....	66
FIGURE 33 : PRÉSENTATION DU PROJET EUROPÉEN OPTAIN (OPTAIN, 2021)	69
FIGURE 34 : EXEMPLE DE VARIATION DU LAI EN FONCTION DU DÉVELOPPEMENT FOLIAIRE AU COURS DE LA SAISON	73
FIGURE 35 : STADES DE DÉVELOPPEMENT DE DIFFÉRENTES CULTURES PENDANT LA SAISON DE CROISSANCE FAO (ALLEN ET AL., 1998).....	75
FIGURE 36 : ILLUSTRATION DE L'EFFET DE θ_s SUR LA COURBE DE RÉTENTION EN EAU DU SOL	79
FIGURE 37 : ILLUSTRATION DE L'EFFET DE K_s SUR LA COURBE DE CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE.....	81

LISTE des tableaux

TABLEAU 1 : COMPARAISON ENTRE LES TYPOLOGIES BIBLIOGRAPHIQUES ET LA TYPOLOGIE NATIONALE FRANÇAISE DES HAIES (AFAC-AGROFORESTERIES, 2019).....	28
TABLEAU 2 : MONTANTS FORFAITAIRES PRIS EN CHARGE PAR LA RÉGION WALLONNE POUR LES PLANTATIONS ET LES ENTRETIENS (YESWEPLANT, 2024).....	43
TABLEAU 3 : QUANTITÉ D’EAU STOCKÉE DANS UN SOL EN FONCTION DE LA TEXTURE ET DU TAUX D’HUMUS (HUDSON, JSWC (1994) CITÉ PAR ARCHAMBEAUD (2023).	55
TABLEAU 4 : TABLEAU DES DIFFÉRENTES BARRIÈRES VÉGÉTALES À IMPLÉMENTER DANS LE MODÈLE MIKE SHE.....	72
TABLEAU 5 : INDICE FOLIAIRE MOYEN ESTIMÉ POUR LES 5 TYPES DE VÉGÉTATION ÉTUDIÉS. RÉSULTATS OBTENUS DANS LA ZONE D’ÉTUDE DU SOMERSET (ROYAUME-UNI) POUR LES MOIS DE JUIN, JUILLET ET AOÛT EN 2007 ET 2008 (POCOCK ET AL., 2010).	84
TABLEAU 6 : REVUE DE LITTÉRATURE SUR LA PROFONDEUR MAXIMALE D’ENRACINEMENT DE DIFFÉRENTS VÉGÉTAUX (VIAUD ET AL., 2005).....	89
TABLEAU 7 : VALEURS DE MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET DE STOCK DE CARBONE EN FONCTION DU TYPE DE SUBSTRAT, DE LA DISTANCE PAR RAPPORT À LA HAIE, DE LA PROFONDEUR DU SOL ET DU TYPE D’HORIZON. RÉSULTATS OBTENUS POUR DES HAIES SUR 7 SITES EN BRETAGNE (WALTER ET AL., 2003).....	90
TABLEAU 8 : TABLEAU DE WALTER ET AL. (2003) MODIFIÉ AVEC LES VALEURS DE TENEUR EN EAU À SATURATION ASSOCIÉES AUX MESURES DE MASSE VOLUMIQUE APPARENTE RÉALISÉES SUR LE TERRAIN.	90
TABLEAU 9 : POROSITÉ TOTALE ET DELTAS CALCULÉS POUR 3 TYPES DE COUVERT DANS LA RÉGION DE TURNHOUT, EN BELGIQUE (VAN DEN BERGE ET AL., 2021).....	91
TABLEAU 10 : POROSITÉ TOTALE ET DELTAS CALCULÉS POUR LES 4 TYPES DE COUVERT DE RÉFÉRENCE SUR LE BASSIN VERSANT DU NORD DU PAYS DE GALLES, AU ROYAUME-UNI. (HOLDEN ET AL., 2019).....	93
TABLEAU 11 : CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE SATURÉE MESURÉE POUR DES HAIES À PLAT EN NORMANDIE (RICHEL ET AL., 2017) ET CALCUL DU DELTA PAR RAPPORT AU SOL DE RÉFÉRENCE DE LA FAO.....	94
TABLEAU 12 : CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE SATURÉE MESURÉE ET NOMBRE MOYEN DE RACINES (> 2 MM) PAR TROU DE MESURE (JUSQU’À 0,15 M DE PROFONDEUR) POUR 4 TYPES DE FORÊTS DU BASSIN VERSANT DE L’EDDLESTON, EN ÉCOSSE (ARCHER ET AL., 2013).....	95
TABLEAU 13 : CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE SATURÉE ET DELTAS CALCULÉS POUR 4 TYPES DE COUVERT DU BASSIN VERSANT DU NORD DU PAYS DE GALLES, AU ROYAUME-UNI (HOLDEN ET AL., 2019).....	96
TABLEAU 14 : CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE SATURÉE MESURÉE POUR DES BANDES DE MISCANTHUS EN BELGIQUE (BOUTARFA ET AL., 2025) ET CALCUL DU DELTA PAR RAPPORT AU SOL DE RÉFÉRENCE DE LA FAO.....	97
TABLEAU 15 : VALEURS MOYENNES ARITHMÉTIQUES ET ÉCARTS-TYPES (ENTRE PARENTHÈSES) DE LA DENSITÉ APPARENTE SÈCHE DU SOL (PB), DE LA POROSITÉ (H) ET DE LA TENEUR EN MATIÈRE ORGANIQUE (OM) POUR LES PARCELLES DE PÂTURES P1 ET P2 ET LES BANDES ENHERBÉES M1 ET M2 ADJACENTES AUX HAIES. SONT ÉGALEMENT PRÉSENTÉES LES VALEURS COMBINÉES POUR LES AIP ET LES HWM. VALEURS OBTENUES POUR UN NOMBRE TOTAL DE 32 ÉCHANTILLONS DANS LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE LEITH AU NORD-OUEST DU ROYAUME-UNI. (WALLACE ET AL., 2021)	98
TABLEAU 16 : VALEURS DE K _{SAT} MOYENNE, MÉDIANE, MINIMUM ET MAXIMUM POUR LES PÂTURES P1 ET P2 ET LES BANDES ENHERBÉES M1 ET M2 ADJACENTES AUX HAIES. VALEURS OBTENUES POUR UN NOMBRE TOTAL DE 32 ÉCHANTILLONS DANS LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE LEITH AU NORD-OUEST DU ROYAUME-UNI. (WALLACE ET AL., 2021)	99
TABLEAU 17 : TABLEAU CROISÉ DES INDICATEURS HYDROLOGIQUES CLÉS ET TYPES DE BARRIÈRES VÉGÉTALES	103

Acronymes

AFAC : Association Française Arbres Champêtres

AWAF : Association Wallonne d'AgroForesterie

BCAE : Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales

CRV : Contrat de rivière de la Vesdre

ETC : EvapoTranspiration Culturelle

ETM : EvapoTranspiration Maximale

ETR : EvapoTranspiration Réelle

ETP : EvapoTranspiration Potentielle

ET₀ : EvapoTranspiration de référence

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations

Hcc : Humidité à la capacité au champ

Hpf : Humidité au point de flétrissement

IAE : Infrastructures Agroécologiques

IRM : Institut Royal Météorologique de Belgique

Kc : Coefficient cultural

Ks : Conductivité hydraulique à saturation

LAI : Indice de surface foliaire (Leaf Area Index)

NBS : Nature Based Solutions

SFN : Solutions Fondées sur la Nature

SSV : Schéma Stratégique du bassin de la Vesdre

RU : Réserve utile

RDU: Réserve difficilement utilisable

RFU : Réserve facilement utilisable

θs : Teneur en eau à saturation

θr : Teneur en eau résiduelle

n : Coefficient de Manning

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

Le changement climatique représente aujourd’hui une des principales menaces qui pèsent sur la biodiversité avec des répercussions majeures sur l’économie mondiale, le bien-être humain et l’environnement. (Ruangpan et al., 2020)

Les populations humaines et les activités économiques qui sont à l’origine de ce réchauffement climatique par le biais des émissions de gaz à effet de serre, sont aujourd’hui fortement impactées par ces changements. (Calvin et al., 2023)

Au vu de la croissance démographique et de l’urbanisation, de la dégradation des écosystèmes ainsi que des projections climatiques futures, les risques hydrométéorologiques associés au réchauffement climatique tels que les inondations, les submersions marines, les glissements de terrain, les sécheresses ou encore les feux de forêt devraient s’intensifier. On prévoit ainsi un renforcement de ces événements extrêmes, dont l’intensité et la fréquence croissante annoncent une météorologie plus violente et imprévisible, à l’origine de catastrophes naturelles majeures (Ruangpan et al., 2020 ; UICN, 2018).

Dès lors, la lutte contre le changement climatique et la réduction des risques naturels représentent ainsi un défi sociétal crucial à la fois pour la sécurité des populations humaines, les activités socio-économiques et pour la protection de la biodiversité (IPCC, 2023; UICN, 2018)

Dans ce contexte global, l’Europe et par le fait même la Belgique, dans laquelle s’inscrit notre recherche, n’échappent pas à la règle et sont confrontées à ces phénomènes récurrents. Afin de mieux comprendre ces enjeux, les sections suivantes abordent plus spécifiquement la manifestation de ces extrêmes hydrologiques à différentes échelles.

1.1.1 LES EXTRÊMES HYDROLOGIQUES EN EUROPE ET EN BELGIQUE

Occurrence des événements extrêmes

Au cours des dernières décennies, l’Europe a été confrontée à des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes de plus en plus fréquents et intenses. Selon l’Agence Européenne de l’Environnement (EEA), l’année 2024 a battu des records de chaleur tant en Europe qu’à l’échelle mondiale. En septembre, de graves inondations en Europe centrale ont affecté près de 2 millions de personnes, tandis qu’en octobre de vastes crues ont inondé Valence, détruisant de nombreux bâtiments et provoquant la mort de 200 personnes. Rien

que sur les six premiers mois de cette année 2025, plus de 208 000 hectares de forêts ont déjà été détruits par des incendies (EEA, 2025).

Les nombreux dommages causés par ces phénomènes mettent en évidence la grande vulnérabilité et le degré élevé d'exposition de certains écosystèmes et de nombreux systèmes humains face à l'instabilité climatique actuelle. (GIEC, 2014)

Ainsi les températures extrêmes n'affectent pas uniquement la santé des populations vulnérables, elles impactent également les rivières et les lacs, compromettant la biodiversité qui en dépend, tandis que les sols deviennent plus secs, augmentant les risques d'incendies et de pertes de productivité agricole (EEA, 2025).

À l'échelle nationale, la Belgique n'est pas épargnée par ces phénomènes extrêmes. Les impacts y sont particulièrement marqués en Wallonie, où la combinaison de conditions naturelles comme les vallées encaissées en Ardenne ou les sols limoneux sensibles à l'érosion en Hesbaye et dans le Condroz, ainsi que diverses pressions anthropiques (urbanisation, agriculture intensive) accentuent la vulnérabilité des territoires. (SPW, 2022)

La vallée de la Vesdre illustre de manière emblématique cette situation, ayant subi au cours de ces dernières années plusieurs événements majeurs, aussi bien en termes de sécheresses que d'inondations. Les paragraphes suivants détailleront successivement ces deux types d'aléas.

Les sécheresses dans la Vallée de la Vesdre

La Wallonie a connu, au cours des dernières décennies, une succession d'épisodes de sécheresse sévère, souvent reconnus comme calamités agricoles par le Gouvernement wallon. La vallée de la Vesdre ne fait pas exception et a régulièrement été touchée par ces épisodes. Les principales années de sécheresse sont présentées ci-dessous :

1. **2017** : une sécheresse prolongée entre août 2016 et juin 2017 a touché 244 communes, affectant notamment les prairies permanentes et temporaires ainsi que le lin textile (SPW, 2018).
2. **2018** : un nouvel épisode survenu entre juin et août a impacté 258 communes, entraînant des pertes importantes sur le maïs, les cultures fruitières et les prairies (SPW, 2020).
3. **2020** : la sécheresse enregistrée entre le 15 mars et le 15 septembre a concerné 253 communes, compromettant de nombreuses cultures (maïs, protéagineux, lin, chanvre, prairies) (SPW, 2021).
4. **2022** : une sécheresse exceptionnelle, concentrée entre juillet et août, qui a touché 254 communes et mobilisé un budget de 27,6 millions d'euros d'aides pour les agriculteurs (Moniteur belge, 2023).

À ces années s'ajoute l'épisode de mars 2025, durant lequel la station climatique d'Uccle (référence nationale) n'a enregistré que 7,8 mm de précipitations, soit le cinquième mois de mars le plus sec depuis 1892 (IRM, 2025). Cet épisode supplémentaire confirme l'augmentation de fréquence des sécheresses en Wallonie, avec une récurrence observée tous les deux à trois ans.

Le graphique de l'IRM¹ (Figure 1), basé sur les données de 1991 à 2025, illustre cette tendance.

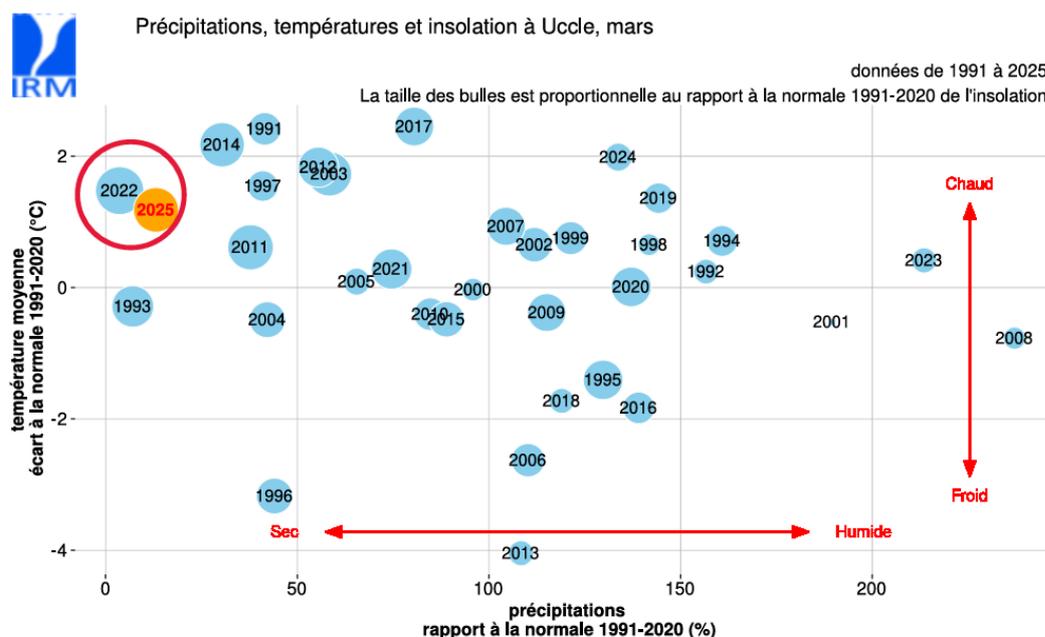


Figure 1 : Comparaison des précipitations, températures et insolation à Uccle au mois de mars par rapport à la normale 1991 à 2020 (IRM, 2025)

La position des bulles reflète les écarts de température moyenne (axe vertical) et de précipitations (axe horizontal) par rapport à la normale climatologique 1991–2020, tandis que leur taille est proportionnelle à l'écart d'ensoleillement par rapport à cette même normale. Les années 2022 et 2025, mises en évidence par un cercle rouge, se distinguent par des précipitations particulièrement déficitaires combinées à des températures supérieures à la normale, traduisant des conditions printanières chaudes et sèches caractéristiques d'épisodes de sécheresse. (IRM, 2025) cité dans (Desmet, 2025).

Si la vallée de la Vesdre est régulièrement touchée par des sécheresses impactant de nombreuses communes et provoquant de nombreux dégâts chez les agriculteurs, elle est également vulnérable aux inondations, dont la catastrophe de juillet 2021 reste l'épisode le plus marquant.

¹ IRM : Institut Royal de Météorologie

Inondations 2021 dans la vallée de la Vesdre

La Wallonie est confrontée de longue date aux inondations, ce qui en fait un enjeu prioritaire de gestion des risques pour la Région wallonne. Cette vulnérabilité est particulièrement marquée dans la vallée de la Vesdre, exemple emblématique de bassin exposé en raison de ses vallées encaissées et de sa pente moyenne élevée (0,73 %), qui confèrent à la rivière un caractère torrentiel. Les précipitations abondantes en provenance des Hautes Fagnes renforcent encore ce contexte, et ces caractéristiques naturelles comptent parmi les facteurs expliquant la récurrence des inondations recensées dans la région depuis 1809 (Contrat de Rivière Vesdre, s. d.-b).

L'épisode des 13 - 16 juillet 2021 constitue l'événement le plus marquant de ces dernières décennies. Les cumuls pluviométriques exceptionnels ont provoqué des crues dévastatrices. Le bilan humain et matériel a été dramatique : 39 victimes, près de 100 000 personnes sinistrées, environ 48 000 bâtiments endommagés (dont 45 000 logements) et des dégâts estimés à 2,8 milliards d'euros (Gouvernement wallon, 2022).

Ces inondations ont été reconnues comme calamité publique par un arrêté du Gouvernement wallon et un décret du Parlement wallon a instauré la même année un régime spécial d'indemnisation des dommages (Parlement wallon, 2021).

Les années suivantes ont également connu des épisodes pluvieux importants ayant provoqué des crues locales. Les pluies persistantes d'octobre 2023 à juin 2024 ont d'ailleurs été officiellement reconnues comme calamité agricole en septembre 2025 (SPW, 2025).

Ces événements pluvieux, mis en parallèle avec les sécheresses récurrentes, mettent en évidence une cyclicité de l'ordre de deux à trois ans des événements hydrologiques extrêmes en Belgique. Cette évolution alarmante confirme les projections du GIEC (2023), selon lesquelles ces phénomènes devraient s'intensifier en Europe et dans le monde sous l'effet du changement climatique (Calvin et al., 2023).

Au-delà du bilan humain et matériel, les inondations de 2021 ont entraîné une prise de conscience de la vulnérabilité des territoires wallons face au changement climatique et ont fait de la prévention des crues une priorité dans le débat public. Les premières mesures visant à accroître la résilience du bassin versant ont été mises en œuvre à travers l'élaboration du Schéma stratégique Vesdre et le renforcement des actions du Contrat de Rivière Vesdre. Dans cette continuité, la gestion des risques doit être pensée à l'échelle du territoire afin de produire des effets concrets au niveau local.

Ces démarches rejoignent la littérature scientifique, qui insiste sur l'importance d'une vision intégrée de la prévention et sur le rôle des solutions fondées sur la nature (Archer et al., 2013; Holden et al., 2019; Ruangpan et al., 2020). Elles soulignent également la nécessité d'une planification coordonnée à long terme pour garantir l'efficacité des mesures d'adaptation. (Calvin et al., 2023).

La prévention repose dès lors à la fois sur une meilleure préparation des populations et sur une gestion raisonnée du territoire, mobilisant des aménagements durables inspirés des processus naturels, souvent moins coûteux et plus résilients que les infrastructures exclusivement bétonnées. Cette idée ouvre la voie à des alternatives plus durables qui seront présentées dans la section suivante.

1.1.2 LES SOLUTIONS BASÉES SUR LA NATURE (NBS)

Les Solutions fondées sur la Nature (SFN) ou « nature based solutions » (NBS) sont définies par l’UICN² comme *“les actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité”*.

Ce concept, relativement récent et inspiré des processus naturels, a été développé pour répondre aux différents défis majeurs tels que le changement climatique, la sécurité alimentaire, l’approvisionnement en eau ou encore la gestion des risques naturels. (Collier, 2021)

Les SFN constituent des solutions complémentaires aux infrastructures grises (solutions d’ingénierie classique) et se déclinent en trois types d’actions :

1. La préservation d’écosystèmes fonctionnels et en bon état écologique,
2. L’amélioration de la gestion d’écosystèmes pour une utilisation durable par les activités humaines,
3. La restauration d’écosystèmes dégradés ou la création de nouveaux écosystèmes (Selles et al., 2023).

Au-delà de l’adaptation climatique et de la réduction des catastrophes, les SFN sont de plus en plus reconnues pour leurs co-bénéfices multiples (Ruangpan et al., 2020), incluant notamment la préservation de la biodiversité, la régulation hydrologique et la séquestration du carbone (Collier, 2021; Selles et al., 2023).

Dans le contexte de la gestion des extrêmes hydrologiques, les SFN jouent un rôle crucial en agissant directement sur les propriétés du sol et les flux d'eau (Collier, 2021).

Les infrastructures agroécologiques linéaires de type haies, bandes enherbées, fascines, murets ou fossés constituent des éléments semi-naturels fonctionnels : elles offrent des habitats stables et des sources de nourriture, favorisent la reproduction des espèces, assurent une connectivité écologique et agissent comme zones tampons en interceptant le ruissellement et en limitant le transfert de polluants. Ces zones peuvent être sèches (haies, fossés, bandes enherbées) ou humides (zones marécageuses, tourbières) (Selles et al., 2023).

²UICN : [SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE – UICN-FR-COLLECTIVITES-BIODIVERSITE.FR](https://www.uicn.org/fr/collectivites/biodiversite/fr/solutions-fondees-sur-la-nature)

Dans les zones agricoles intensives, des expérimentations ont montré que les zones tampons telles que les fascines et les haies arbustives atténuent le transfert du ruissellement, de l'érosion et des polluants diffus vers l'aval des parcelles. Plus compactes que les bandes enherbées, elles sont souvent mieux acceptées par les agriculteurs, bien que leur efficacité doive être évaluée au cas par cas (Richet et al., 2017).

La multifonctionnalité des SFN s'exprime aussi face à la sécheresse. Bien que peu d'études aient spécifiquement étudié ce rôle, certaines mentionnent que la collecte d'eau de pluie réduit la consommation domestique, que les forêts protègent les réserves pour l'irrigation et que les SFN favorisent la recharge des nappes et le maintien de l'humidité du sol (Ruangpan et al., 2020).

En résumé, les SFN représentent des solutions innovantes et polyvalentes. Non seulement, elles permettent de réduire les risques hydrologiques mais génèrent également des bénéfices pour l'agriculture, la biodiversité, le climat et la société. Dans le bassin de la Vesdre, leur mise en œuvre repose aujourd'hui sur une combinaison d'initiatives politiques et scientifiques appuyée par des collectifs locaux dynamiques. La section suivante s'attachera à détailler ces différents outils de gestion.

1.1.3 ACTIONS POLITIQUES

Depuis 2021, la gestion du bassin de la Vesdre repose sur un ensemble d'acteurs et d'initiatives complémentaires : la Région wallonne à travers le Schéma Stratégique Vesdre, le projet scientifique MODREC-Vesdre porté par l'Université de Liège et le SPW³ ainsi que le Contrat de Rivière Vesdre qui rassemble communes et acteurs locaux.

Schéma stratégique du bassin de la Vesdre

À la suite des inondations de juillet 2021, la Région wallonne a engagé la mise en place d'un schéma stratégique pluridisciplinaire pour le bassin de la Vesdre (SSV). Finalisé en 2023, ce document propose une vision à l'horizon 2050 fondée sur deux objectifs principaux : la résilience et la solidarité du territoire face aux risques liés au changement climatique. Le schéma aborde également la qualité de vie, la biodiversité et le redéveloppement économique et social. Il s'articule autour de dix axes prioritaires qui permettent d'assurer une cohérence entre les différentes politiques d'adaptation aux inondations et aux sécheresses (La Vallée de la Vesdre, s. d.)

³ SPW : Service Public de Wallonie

Bien qu'il ne soit pas contraignant au sens du CoDT⁴, le schéma stratégique fournit des orientations pratiques pour les communes qui peuvent les intégrer dans leurs documents d'aménagement du territoire. Un plan d'action a été mis sur pied avec des horizons à court, moyen et long terme ainsi qu'un laboratoire de transition qui permet d'assurer la coordination et la participation des différents acteurs. Cette participation associe les communes du bassin de la Vesdre, la Province de Liège, la Région wallonne, le Contrat de Rivière Vesdre, des collectifs citoyens, ainsi que les équipes scientifiques de l'Université de Liège impliquées dans le projet MODREC-Vesdre, dont les résultats alimenteront la prochaine mise à jour du schéma stratégique (Gouvernement wallon, 2022; La Vallée de la Vesdre, s. d.).

Projet MODREC-Vesdre

En parallèle, un programme de recherche a été mené par l'Université de Liège (HECE et Gembloux Agro-Bio Tech) en collaboration avec le Service public de Wallonie (SPW). Ce projet, dit MODREC-Vesdre, vise à développer un outil de modélisation hydrologique et hydraulique du bassin de la Vesdre. Il comprend deux volets : une modélisation conceptuelle à l'échelle du bassin entier ainsi qu'une modélisation physiquement basée sur trois sous-bassins représentatifs (forestier, agricole, tourbeux).

L'objectif est d'évaluer quantitativement l'impact de différentes mesures de restauration hydrologique envisagées dans le cadre du Schéma stratégique, et de fournir aux décideurs un support objectif pour comparer les scénarios de gestion (Degré et al., 2024).

Contrat de Rivière Vesdre

Le Contrat de Rivière Vesdre (CRV) représente un dispositif central dans la gestion du bassin de la Vesdre. Il s'agit d'un partenariat volontaire qui rassemble les 18 communes riveraines, la Province de Liège, le SPW et de nombreux acteurs locaux. Ce partenariat repose sur la mise en place d'un programme d'actions triennal visant la restauration de la qualité des cours d'eau et de leurs abords. Le protocole 2023–2025 prévoit notamment des actions en faveur de la restauration écologique, de la lutte contre les espèces exotiques envahissantes, de l'amélioration de la qualité de l'eau, de la sensibilisation du public et du suivi des pratiques agricoles en lien avec la protection des sols et de l'eau (Contrat de Rivière Vesdre, 2018).

Ces initiatives témoignent d'une volonté croissante d'intégrer des solutions basées sur la nature dans la gestion du bassin de la Vesdre. Parmi celles-ci, les haies jouent un rôle central et constituent l'objet de ce travail.

⁴ CoDT : Code du Développement Territorial

1.2 PROBLÉMATIQUE

Les inondations dramatiques de juillet 2021 en Wallonie ont révélé la forte vulnérabilité des bassins versants agricoles face aux épisodes de pluies extrêmes. Cette vulnérabilité résulte en grande partie de l'utilisation anthropique du territoire : construction en zones inondables, imperméabilisation croissante des surfaces, pratiques agricoles favorisant le ruissellement et disparition progressive des haies suite aux opérations de remembrement. Ces transformations accentuent la concentration des écoulements de surface, entraînant des ruissellements importants, des inondations et des dégâts matériels et humains considérables.

Parmi les solutions basées sur la nature, les haies apparaissent comme une mesure efficace pour ralentir le ruissellement et favoriser l'infiltration. Toutefois, elles restent encore peu mises en œuvre dans les aménagements de bassin versant, notamment parce qu'il est nécessaire de proposer aux agriculteurs wallons des solutions adaptées à leur réalité de terrain : un type de barrière végétale spécifique pour un risque donné. Pour qu'elles soient réellement adoptées, ces solutions doivent également tenir compte des coûts, des contraintes d'entretien et des bénéfices attendus. C'est pourquoi ce travail se concentre sur les haies subventionnées en Région wallonne, afin d'évaluer leur efficacité hydrologique et leur intégration potentielle dans une stratégie de gestion préventive des inondations.

Dans ce contexte, l'élaboration d'un modèle hydrologique capable de tester différents scénarios d'aménagement tenant compte des caractéristiques hydrologiques des différents types de haies apparaît essentielle. Ce modèle doit s'appuyer sur des données issues d'études de terrain menées en Europe, dans des contextes comparables à celui de la Wallonie, afin de proposer des solutions réalistes et applicables à la prévention des inondations.

1.3 OBJECTIF

L'objectif de ce travail est d'améliorer la représentation pédologique et végétative des haies dans un modèle hydrologique distribué, afin d'affiner la simulation des processus d'infiltration et de ruissellement. Il s'agit d'une part, d'évaluer la contribution des haies à la réduction du ruissellement et, d'autre part, d'identifier les types de haies les plus adaptés en tenant compte de leur impact sur le sol, des contextes climatiques et biophysiques ainsi que des reliefs observés dans les paysages agricoles tempérés européens.

1.3.1 SUJET DU MÉMOIRE

Ce mémoire, intitulé « *Caractérisation des haies dans les paysages agricoles : typologie, paramètres pédologiques et végétatifs pour une modélisation hydrologique affinée* », porte sur l'analyse des connaissances existantes relatives aux effets de ces structures linéaires sur le cycle de l'eau. L'étude vise à établir une typologie des haies et à identifier les paramètres pédologiques et végétatifs les plus déterminants pour leur rôle

hydrologique. L'objectif est de constituer une synthèse de connaissances destinées à affiner la modélisation dans le logiciel MIKE SHE et à évaluer différents scénarios d'aménagements appliqués au bassin versant de la Vesdre.

1.3.2 HYPOTHÈSES ET MÉTHODOLOGIE

Cette recherche s'articule autour de deux hypothèses principales :

Hypothèse 1 : Les haies implantées dans les paysages agricoles européens contribuent à la régulation hydrologique des bassins versants en favorisant l'infiltration et l'évapotranspiration réelle.

Hypothèse 2 : L'efficacité hydrologique des haies en Europe varie en fonction de leur typologie et des caractéristiques pédologiques et végétatives qui leur sont associées.

Afin d'analyser ces hypothèses, la méthodologie retenue s'articule en deux étapes : une étude bibliographique suivie d'un tableau croisé.

Étude bibliographique

Une exploration de la littérature scientifique et grise sera réalisée, en mobilisant des mots clés tels que :

Hedgerow, vegetative barriers, surface runoff, soil hydraulic conductivity, Leaf area index (LAI), soil water content, hydraulic roughness, temperate climate, root density, root depth distribution, nature-based solution, European farmlands, soil erosion.

Cette recherche prend en compte non seulement les articles scientifiques évalués par les pairs, mais également les guides pratiques, rapports techniques et documents institutionnels pertinents.

L'objectif est de rassembler et de comparer les données de terrain disponibles en climat tempéré européen afin d'évaluer l'influence des haies sur les processus liés à la circulation de l'eau. (Conductivité hydraulique, porosité, rugosité, interception, enracinement, etc..). Cette recherche permet également d'établir une typologie des haies décrites dans la littérature, en mettant en évidence leur composition, leur structure et leur positionnement afin d'identifier les paramètres clés influençant leur rôle hydrologique à l'échelle du sol et de la végétation dans les paysages agricoles tempérés européens.

Tableau croisé

Dans le prolongement de cette recherche bibliographique, un tableau croisé rassemblant les données récoltées est élaboré afin d'associer les différents types de haies subventionnées en Région wallonne aux principaux paramètres hydrologiques nécessaires à leur représentation dans un modèle hydrologique comme MIKE SHE.

Ce tableau sert d'outil de synthèse permettant de comparer les résultats d'études de terrain menées en climat tempéré et de mettre en évidence les effets potentiels des haies par rapport à d'autres types de couvert végétal.

L'objectif final est de discuter de la pertinence de ces valeurs et de leur transposabilité au paramétrage du modèle MIKE SHE, tout en identifiant les incertitudes et les besoins de recherches futures.

2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 QUELS SONT LES DIFFÉRENTS TYPES DE HAIES EXISTANTES ?

L'étude de la littérature scientifique et grise montre que le terme « haie » recouvre une grande variété de réalités et n'a pas de définition unique. La haie renvoie d'abord aux espèces ligneuses qui la composent, mais les appellations diffèrent d'un auteur à l'autre, ce qui complique sa classification. Comme le rappellent Montgomery et al. (2020), « *La seule caractéristique cohérente des haies est leur structure linéaire surélevée par rapport au niveau du sol environnant* ». Dans une autre perspective, Richet et al. (2019) proposent d'élargir ce concept avec la notion de haies herbacées, désignant des dispositifs de graminées implantés pour jouer un rôle de frein hydraulique.

Face à cette diversité, les dénominations rencontrées seront regroupées et confrontées au référentiel national français (Afac-Agroforesteries, 2019), qui propose une typologie structurée en six classes et vingt-trois types distincts (Annexe 1). Un tableau de correspondance entre les catégories retenues dans la recherche bibliographique et les codes Afac⁵ sera présenté en fin de section.

Ce travail présente dans un premier temps une typologie structurelle, centrée sur la morphologie et la composition végétale des haies, avant d'aborder plus loin une typologie plus fonctionnelle, organisée autour des services écosystémiques rendus (biodiversité, production, régulation hydrologique, paysage).

Cette approche, fondée sur les principales références scientifiques et techniques (Afac-Agroforesteries, 2019; Awaf, 2020; Bauer & Davin, 2013; Gillain et al., 2021; Giser, 2023; Natagriwal, 2024b; Richet et al., 2019), servira de base pour comparer les typologies françaises et belges.

2.1.1 TYPOLOGIE

LES HAIES LIGNEUSES

Les haies ligneuses regroupent l'ensemble des plantations composées d'espèces végétales produisant du bois, qu'il s'agisse d'arbustes ou d'arbres. Elles constituent la catégorie la plus classique des haies, par opposition aux haies herbacées plus récemment définies.

⁵ Afac : Association Française Arbres Champêtres

1) Haies arbustives

Les haies arbustives sont composées principalement d'arbustes tels que l'aubépine, le prunellier, le noisetier ou le troène. Elles peuvent évoluer librement, avec un développement favorable à la biodiversité, ou être taillées, ce qui leur confère une structure plus basse et régulière. Elles forment souvent la strate de base des haies champêtres, et leur densité peut être modulée selon les objectifs recherchés.



Figure 2 : Haie arbustive taillée (Afac-Agroforesteries, 2019)

Dans cette catégorie, on distingue notamment les taillis linéaires (ou cépées) et les haies plessées, qui se différencient par leur mode de gestion.

Taillis linéaires/cépées

La haie en cépée ou taillis linéaire est constituée de rejets multiples issus d'une même souche, après un recépage effectué à 5–10 cm du sol. Sa gestion repose sur des coupes cycliques (tous les 2 à 5 ans), favorisant une densité élevée de tiges à la base. Cette structure dense la rend efficace pour freiner le ruissellement et piéger les sédiments, tout en étant adaptée à la production de biomasse (bois énergie, BRF⁶).



Figure 3 : Taillis linéaire de noisetiers avant et après recépage (Afac-Agroforesteries, 2019)

⁶ BRF : Bois raméal fragmenté, issu du broyage de jeunes rameaux, utilisé comme paillage pour enrichir et structurer le sol.

Haies plessées

La haie plessée est une haie vivante conduite selon une technique traditionnelle de tressage. Elle consiste à fendre partiellement les troncs ou branches des arbustes à leur base, puis à les incliner et les tresser afin de former une clôture végétale dense et vivante. Autrefois utilisée pour contenir le bétail et renforcer le bocage, cette pratique confère aujourd'hui à la haie une forte valeur patrimoniale et paysagère. Elle améliore également ses fonctions écologiques et hydrauliques en créant une barrière continue favorable à la biodiversité et au ralentissement du ruissellement.



Figure 4 : Haie de charmes récemment plessée (Afac-Agroforesteries, 2019)

2) Haies vives

Les haies vives, constituées d'essences locales, regroupent plusieurs appellations : haies libres, mixtes, champêtres ou composites. Elles se déclinent en deux formes principales :

- **Monospécifiques** : composées exclusivement d'une seule espèce en rangs serrés, comme les haies de hêtres taillés,
- **Mixtes** : associant plusieurs essences locales et présentant une structure multi-strates (strate basse, arbustive et arborée).

Elles peuvent être conduites libres ou taillées selon les objectifs recherchés (clôture, brise-vent, paysage, biodiversité).



figure 5 : Haies vives et champêtres multi- strates (Afac-Agroforesteries, 2019)

Dans cette catégorie, on distingue les haies bocagères et les haies ripisylves, qui se différencient par leur caractère traditionnel et leur lieu d'implantation.

Haies bocagères

Les haies bocagères sont des haies multi-strates, associant une strate herbacée, arbustive et arborée. Elles sont souvent implantées sur un talus ou accompagnées d'un fossé, ce qui renforce leur efficacité hydrologique en ralentissant le ruissellement, en favorisant l'infiltration et en piégeant les sédiments. Elles constituent un élément central des paysages bocagers⁷, contribuant à la fois à structurer le paysage, à soutenir la biodiversité et à limiter l'érosion. Lorsque ces haies ne sont plus entretenues, elles peuvent évoluer vers des haies « relictuelles », souvent réduites à quelques arbres ou tiges disséminées, vestiges d'anciens maillages bocagers aux fonctions écologiques et hydrologiques amoindries.



Figure 6 : Maillage bocager assurant la liaison entre l'intérieur des terres et la rivière grâce aux haies ripisylves (Paysan Breton, 2025)

⁷ Le bocage désigne un paysage agricole traditionnel structuré par un maillage dense de haies.

Haies ripisylves

Les haies ripisylves correspondent à des haies vives implantées le long des cours d'eau. Elles sont généralement constituées d'essences locales adaptées aux zones humides, comme le saule, l'aulne ou le frêne. Leur rôle est multiple : stabilisation des berges par leurs systèmes racinaires, filtration des sédiments et nutriments issus des parcelles agricoles, maintien de la continuité écologique. Elles contribuent également à la régulation thermique des rivières grâce à l'ombrage fourni par la strate arborée. Leur rôle hydrologique est ainsi complémentaire de celui des haies bocagères, avec une localisation spécifique en bord de cours d'eau.



Figure 7 : Haie ripisylve le long de la Vesdre (Contrat de Rivière Vesdre, s. d.-a)

3) Haies arborées

Les haies arborées associent une haie arbustive à une strate arborée composée d'arbres de haut-jet ou d'arbres têtards⁸. Cette configuration crée une structure multi-strates qui cumule les fonctions d'une haie arbustive classique avec les apports spécifiques des arbres (brise-vent, production de bois d'œuvre ou de fruits et création d'habitats arboricoles). En Wallonie, ce type est fréquemment rencontré dans les haies champêtrées enrichies d'arbres de haut-jet (Figure 9) ou dans les paysages traditionnels intégrant des arbres têtards.



Figure 8 : Haies arborées avec arbres têtards (Bauer & Davin, 2013)

⁸ Un arbre têtard est un arbre régulièrement taillé au sommet de son tronc.

4) Alignement d'arbres

Les alignements d'arbres sont des structures linéaires composées exclusivement d'arbres espacés, sans strate arbustive à la base. Souvent constitués de peupliers, de fruitiers ou d'essences de haut-jet, ils sont implantés en bordure de parcelles agricoles ou le long de routes et chemins. Considérés comme une forme d'agroforesterie, ils assurent des fonctions de production (bois, fruits), de structuration paysagère et d'ombrage, mais restent moins efficaces que les haies multi-strates pour limiter le ruissellement et offrir une continuité écologique.

Alignement d'arbres de haut-jet

Ces alignements sont formés d'arbres élancés (chêne, frêne, tilleul) conduits sur tronc unique avec un houppier développé. Plantés en ligne, ils forment un alignement simple d'arbres espacés de grande hauteur. Leur gestion nécessite un suivi spécifique (taille de formation, élagage) notamment lorsqu'on vise la production de bois d'œuvre. Par leur hauteur, ils renforcent l'effet brise-vent (la zone protégée pouvant atteindre 15 à 20 fois la hauteur des arbres) et offrent des habitats variés pour la faune (cavités, perchoirs, sites de nidification).



Figure 9 : Alignement d'arbres de haut-jet (Gillain et al., 2021)



Figure 10 : Alignement de frênes têtards (Afac-Agroforesteries, 2019)

Alignement de têtards

Les alignements de têtards sont constitués d'arbres régulièrement recépés en tête, comme les frênes ou les saules. Cette conduite traditionnelle, caractéristique de certains terroirs agricoles (Bocage du Pays de Herve, bocage de Normandie), visait historiquement la production de bois et de fourrage hors de portée du bétail. Aujourd'hui, elle est surtout valorisée pour son rôle patrimonial et écologique. Les têtes anciennes, souvent creuses, abritent une biodiversité spécifique (oiseaux cavernicoles, chauves-souris, invertébrés) et constituent un élément marquant du paysage rural.

Catégories (Recherche bibliographique)	Codes (typologie) (Afac-Agroforesteries, 2019)	Désignation (catégories) (Afac-Agroforesteries, 2019)
Haies arbustives	4 – 5 7	Taillis simple Taillis mixte
Taillis linéaire/cépées	4 – 5 7 - 8	Taillis simple Taillis mixte
Haies plessées	7	Taillis mixte
Haies vives Haies bocagères	15 - 23	Taillis sous futaie (Haies multi-strates)
Haies ripisylves	8 12 - 13	Taillis mixte Futaie irrégulière
Haies arborées (Arbres + arbustes)	15 - 23	Taillis sous futaie
Alignement de haut-jet	9 - 10 12 - 14	Futaie régulière Futaie irrégulière
Alignement de têtards	11	Futaie régulière

Tableau 1 : Comparaison entre les typologies bibliographiques et la typologie nationale française des haies (Afac-Agroforesteries, 2019)

Ce tableau met en évidence la diversité des appellations de haies rencontrées dans la littérature et la difficulté de les faire correspondre aux catégories normalisées du référentiel national français (Afac-Agroforesteries, 2019).

Le vocabulaire courant, souvent lié aux usages (haie bocagère, ripisylve, haie plessée), ne se superpose pas toujours aux typologies sylvicoles (taillis, futaie, cépées), ce qui peut créer des ambiguïtés dans les comparaisons entre études et aménagements. Cette difficulté explique pourquoi certains organismes, comme

l'AWAF⁹ en Wallonie, privilégient une typologie fonctionnelle fondée sur les objectifs recherchés (brise-vent, biodiversité, anti-érosion, etc.) plutôt qu'une classification structurale stricte. Une telle approche permet de mieux prendre en compte la spécificité des contextes locaux (sols, topographie, microclimat) et d'adapter les aménagements aux besoins concrets des usagers du territoire.

LES HAIES HERBACÉES

Les haies herbacées, également appelées « *haies anti-érosives* », se présentent sous forme de bandes étroites de plantes vivaces (graminées, carex, miscanthus, etc.) implantées perpendiculairement à la pente, en bordure ou à l'intérieur des parcelles agricoles. Leur largeur est généralement d'environ 1 mètre. En formant une végétation dense dès le niveau du sol, elles freinent le ruissellement, favorisent la sédimentation et stabilisent les sols. (Richet et al., 2019).

Miscanthus

Le miscanthus est une graminée pérenne présente en Wallonie depuis les années 1990. Il peut être cultivé pendant près de 20 ans sans devoir être replanté, avec une récolte annuelle et peu d'entretien une fois la culture installée. Dense et vigoureux, il forme rapidement une barrière végétale efficace contre l'érosion, en réduisant le ruissellement et en piégeant les sédiments en bordure de parcelles ou de cours d'eau. Ses rendements en biomasse se stabilisent à partir de la 4^e année, avec des moyennes observées en Wallonie de 12 à 24 t/ha. L'investissement initial est conséquent, mais l'entretien reste limité et il offre de nombreux débouchés (énergie, paillage, litière, matériaux biosourcés) (Richet et al., 2019; Valbiom, 2016).



Figure 11 : Parcelle de miscanthus âgé d'un an (Valbiom, 2016).

⁹ AWAF : Association Wallonne d'AgroForesterie

2.1.2 DENSITÉ, STRUCTURE

Les haies, dans leur multiplicité, présentent des structures architecturales à une, deux ou trois strates, et des densités plus ou moins marquées selon le choix des espèces, l'âge des plantations et leur mode de gestion. La structure se définit par l'organisation verticale de la haie (nombre d'étages, forme des arbres), tandis que la densité traduit la compacité de la végétation et l'espacement des tiges, surtout à la base.

Une haie conduite en cépée favorise une densité élevée de rejets, tandis qu'une haie vive multi-strates laissée libre agit surtout par son emprise surfacique plus large et sa canopée plus étendue qu'une haie arbustive taillée régulièrement. Ceci se traduit par un renforcement de l'interception des précipitations, de l'infiltration et du maintien de l'humidité du sol.

La densité et la structure des haies varient ainsi selon leur composition, leur gestion et leur mode de plantation, qu'elles soient établies en simple, double ou triple rang. Elles peuvent également être modulées en fonction des objectifs recherchés (Afac-Agroforesteries, 2019; Awaf, 2020; Gillain et al., 2021).



Figure 12 : Organisation architecturale en 3 étages d'une haie vive (Bauer & Davin, 2013).

2.1.3 ASSOCIATION

Plusieurs combinaisons de dispositifs peuvent être mises en place afin de renforcer l'efficacité hydraulique des haies. Les exemples suivants en illustrent quelques configurations :

Pour conjuguer les effets positifs sur l'infiltration et sur la sédimentation, Ouvry et al. (2012) mettent en avant l'intérêt des associations du type haie + fascines ou haie + fascines + bande enherbée (miscanthus, fétuque élevée ou vétiver). Dans les régions érosives françaises, Ouvry et al. (2012) soulignent le concept « *une haie doublée d'une fascine sur le chemin de l'eau à l'échelle de mon exploitation* » qui peut, selon les situations, être complétée par une bande enherbée ou un chenal enherbé.

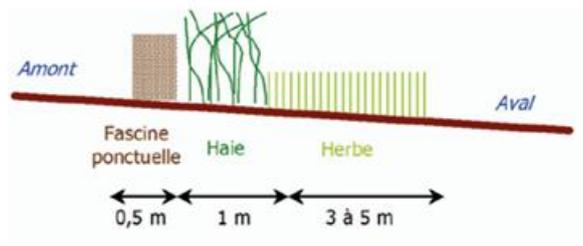


Figure 13 : Exemple de mise en place et illustration d'une association fascine, haie et bande enherbée (Ouvry et al., 2012)

L'exemple de la cellule Giser illustre une gestion efficace du ruissellement en amont de parcelle cultivée. La fascine mise en place assure une protection mécanique contre le ruissellement durant les premières années de croissance de la haie. (Giser, 2023)



Figure 14 : Illustration de plantation d'une haie dense en trois rangs, protégée en amont par une fascine. La flèche bleue représente le sens du ruissellement (Giser, 2023)

La solution d'un fossé en amont d'une haie sur talus permet d'accroître l'infiltration des écoulements en cas de sol perméable et de piéger les sédiments (Ouvry et al., 2012)



Figure 15 : Association d'une haie plantée sur talus et d'un fossé d'infiltration (Ouvry et al., 2012)



Figure 16 : Association entre diverses zones tampons : haies arborées sur talus et chenal (Viaud & Thomas, 2019)

Cette illustration présente une association entre différentes zones tampons, comprenant des haies arborées implantées sur un talus en bordure de chenal. Ces aménagements, considérés comme des infrastructures agroécologiques, jouent un rôle essentiel d'interception du ruissellement et de réduction des transferts de polluants. En combinant haies, bandes enherbées et éléments humides, ils contribuent à la régulation hydrologique, à la protection de la qualité de l'eau et à la recharge locale des nappes (Selles et al., 2023; Viaud & Thomas, 2019).

L'association de zones tampons prend tout son sens dans le contexte pédologique wallon, où les sols limoneux sont rapidement soumis à des phénomènes de battance et d'érosion. Richet et al. (2017, 2019) soulignent d'ailleurs que face aux coulées boueuses récurrentes en contexte limoneux, c'est la combinaison de plusieurs dispositifs (haies ligneuses, haies herbacées, fascines, bandes enherbées) qui permet d'en renforcer l'efficacité. Ces dispositifs ne sont toutefois pleinement efficaces que si leur implantation est réfléchie. Leur positionnement dans le paysage reste un facteur déterminant pour garantir la pertinence de leur action.

2.1.4 POSITIONNEMENT ET ORIENTATION

Selon Viel et al. (2014), l'efficacité hydrologique des haies repose avant tout sur leur organisation spatiale au sein du bassin versant, plutôt que sur leur densité. Leur impact varie selon leur orientation par rapport à la pente (Merot et al., 1999) et leur positionnement stratégique sur les trajets d'écoulements concentrés, en tête de bassin, en ceinture de versant ou en fonds de vallée (Ouvry et al., 2012; Richet et al., 2019).

L'efficacité des haies vis-à-vis de l'interception des écoulements de surface dépend de leur orientation par rapport aux chemins de l'eau et à la pente, de la continuité et de la rugosité de sa structure au sol (ex. : présence d'un talus), et de l'intensité des précipitations qui génèrent le ruissellement de surface (Viaud & Thomas, 2019).

Ces auteurs proposent un schéma récapitulatif illustrant ces différentes stratégies de positionnement (Ouvry et al., 2012; Richet et al., 2019) (Figure 17).



Figure 17 : Localisation stratégique des haies et fascines pour limiter le transfert des eaux de ruissellement (Ouvry et al., 2012; Richet et al., 2019)

1) Les haies perpendiculaires à la pente

Lorsqu'elles sont disposées perpendiculairement à la pente, elles protègent les sols contre l'érosion en retenant les terres transportées par l'écoulement des eaux. Implantées sur talus et suivant les courbes de niveau, elles se révèlent particulièrement efficaces pour la filtration, la purification de l'eau et la lutte contre l'érosion, tout en contribuant à souligner le relief et à structurer le paysage (Parc naturel régional du Verdon, 2024). Certaines haies implantées parallèlement aux courbes de niveau fonctionnent comme de véritables puits d'infiltration, capables de contrôler jusqu'à 40 % de la surface d'un bassin versant (Merot et al., 1999). Enfin, une haie perpendiculaire au versant peut être associée à des fossés discontinus, ou implantée sur talus, afin d'accroître encore sa capacité d'infiltration et son rôle anti-érosif (Ouvry et al., 2019).

2) Les haies en tête de bassin et en ceinture de versant

Leur implantation en amont permet de limiter la formation et la concentration des écoulements dès leur origine, réduisant ainsi l'érosion sur les parcelles en pente. La localisation des haies est particulièrement adaptée sur les trajets d'écoulements concentrés en tête de bassin versant ou en aval de parcelles érodables, où de petits débits transportent d'importantes charges de sédiments grossiers. Pour rester dans des conditions de débits faibles, il convient de privilégier des sites adaptés ou de prévoir une longueur suffisante afin d'étaler les écoulements (Ouvry et al., 2012). À l'échelle du bassin versant, il est recommandé d'implanter en amont des dispositifs de type haies, fascines ou bandes enherbées, puis d'équiper les talwegs¹⁰ plus en aval de chenaux enherbés ou de prairies permanentes. Sur les versants ou dans les têtes de talwegs peu pentus, l'association d'une haie en amont avec une bande enherbée en aval permet en outre d'accroître le taux de sédimentation en étalant les écoulements sur une grande largeur et une faible lame d'eau (Ouvry et al., 2019). Le Giser (2023) recommande ce positionnement stratégique en tête de bassin versant ou à l'aval immédiat des parcelles érodables, afin de contenir les terres, de ralentir les débits faibles mais chargés en éléments grossiers, et de favoriser l'infiltration.

3) Les haies de fond de vallée

Elles ont pour fonction principale de ralentir et de stocker temporairement les écoulements, jouant un rôle de régulation hydrologique lors des pluies fréquentes (Merot et al., 1999). Elles sont particulièrement adaptées aux zones planes et aux fonds de vallon, où l'eau tend à s'accumuler ou à s'étaler de manière diffuse (Giser, 2023; Ouvry et al., 2012). Dans ces contextes, leur efficacité est renforcée lorsqu'elles sont implantées sur plusieurs mètres de linéaire ou associées à des fossés d'infiltration (Giser, 2023).

¹⁰ Talweg : zone de concentration naturelle du ruissellement, correspondant à l'axe d'écoulement principal en fond de vallée ou de versant.

L'orientation de la haie joue un rôle tout aussi important et doit être soigneusement réfléchi en fonction de l'objectif recherché : placée perpendiculairement aux vents dominants, elle assure un effet brise-vent sur une distance équivalente de 15 à 20 fois sa hauteur (Jacobs et al., 2022; Parc naturel régional du Verdon, 2024). Pour un effet d'ombrage, l'orientation par rapport au soleil est également déterminante : une implantation sur un axe nord-sud limite les effets d'ombre sur les cultures, tandis qu'un axe est-ouest peut créer des zones ombragées favorables en période estivale (Jacobs et al., 2022). Ainsi, l'effet brise-vent des arbres mais aussi l'ombre portée peuvent permettre de limiter l'assèchement des cultures et assurer leur bon développement (Parc naturel régional du Verdon, 2024).

2.1.5 DIFFÉRENTES FONCTIONS REMPLIES PAR CES BARRIÈRES VÉGÉTALES

Les fonctions d'une haie dépendent étroitement de sa typologie, de sa composition végétale et de sa situation dans le paysage. En Wallonie, l'Association wallonne pour l'agroforesterie (AWAF) a développé une approche basée sur une typologie fonctionnelle, qui permet de choisir les espèces et les modes de plantation en fonction des différentes régions bioclimatiques du territoire et de l'objectif prioritaire recherché.

Cette approche met en évidence le fait que les haies ne remplissent pas une seule fonction, mais au contraire un ensemble de fonctions complémentaires, comme le soutien à la biodiversité, la limitation de l'érosion et la gestion du ruissellement, le rôle de brise vent, la production de fruits et de biomasse (plaquettes, bois d'œuvre), l'apport de complément fourrager ainsi qu'une fonction de clôture.

La haie représente à elle seule un écosystème, où une diversité d'espèces vivent, se nourrissent et se reproduisent. Les interactions qui s'y développent sont à l'origine des services écosystémiques qu'elle rend.

La Figure 18 illustre quelques-unes de ces fonctions :

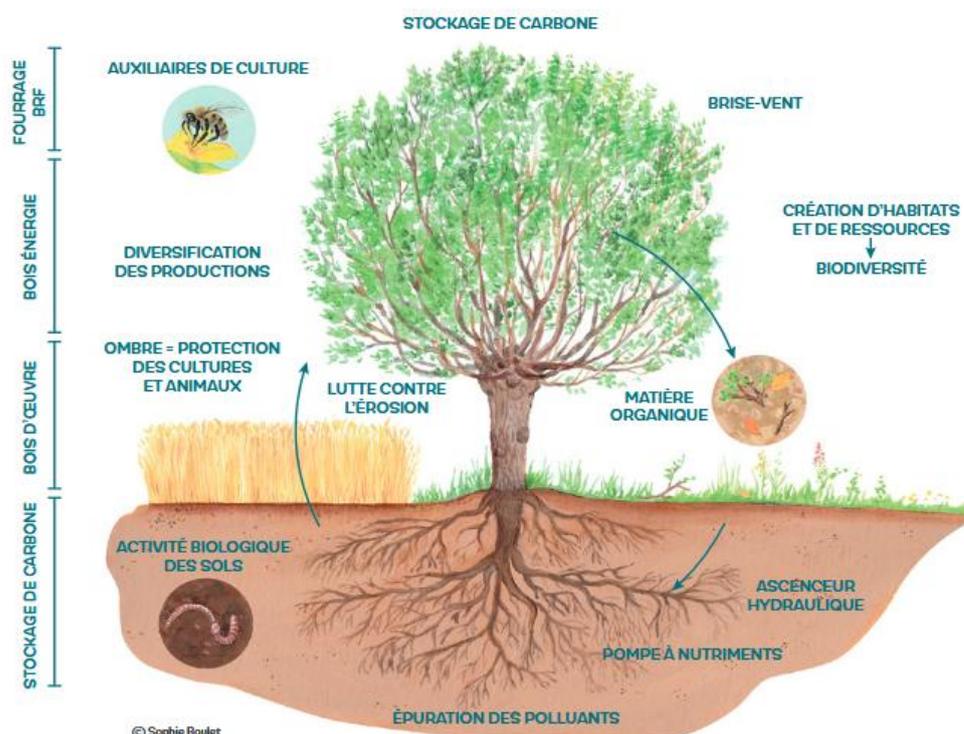


Figure 18 : Services écosystémiques rendus par une haie (Parc naturel régional du Verdon, 2024)

Parmi l'ensemble des services écosystémiques rendus par les haies, certaines fonctions apparaissent particulièrement déterminantes pour la gestion hydrologique et agroécologique des paysages agricoles. Voici quelques-unes de ses fonctions principales :

1. FAVORISER LA BIODIVERSITÉ



11

La haie constitue à la fois le gîte et le couvert : elle sert de refuge à de nombreux oiseaux, insectes et petits mammifères, tout en leur fournissant nourriture (baies, fruits, graines) et sites de reproduction. Par sa structure multi-strates (arbres, arbustes, strate herbacée), elle favorise une forte diversité biologique et assure une fonction de corridor écologique facilitant le déplacement des espèces (Awaf, 2020).

¹¹ Ces logos sont extraits de la brochure de l'AWAF. Ils constituent un rappel visuel des différentes fonctions possibles de la haie et visent à faciliter le choix du type de plantation en fonction des objectifs poursuivis (Awaf, 2020).

Haies mellifères

Composées d'essences dont les fleurs produisent nectar et pollen, elles soutiennent l'apiculture mais surtout les pollinisateurs sauvages, indispensables à la reproduction des plantes. Pour être efficace, une haie mellifère doit associer des espèces à floraisons étalées dans l'année, afin de fournir une ressource alimentaire continue, y compris en dehors des grandes périodes de floraison (Parc naturel régional du Verdon, 2024).

Haies cynégétiques¹² et frugifères

Ces haies, riches en arbustes fruitiers (églantier, cornouiller, sorbier, fruitiers sauvages), constituent une ressource alimentaire pour le gibier et la faune sauvage en hiver. Elles offrent également des abris et, à long terme, des cavités favorables aux oiseaux et aux chauves-souris si l'on conserve des arbres de haut-jet. Lorsqu'elles sont positionnées entre deux boisements, elles jouent un rôle de liaison paysagère en rétablissant la continuité écologique. (Parc naturel régional du Verdon, 2024)

Accueil d'insectes auxiliaires des cultures

Au-delà des pollinisateurs, les haies hébergent de nombreux insectes auxiliaires jouant un rôle majeur dans la régulation des ravageurs : araignées et punaises se nourrissent, par exemple, de pucerons, psylles ou cochenilles. Ainsi, les haies contribuent directement à la protection biologique des cultures (Awaf, 2020).

2. LIMITATION DE L'ÉROSION



Lors d'épisodes de précipitations intenses, les phénomènes d'érosion hydrique peuvent être considérables : pertes de sols fertiles, formation de ravines, colmatage des infrastructures en aval, avec des coûts élevés tant pour les agriculteurs que pour les collectivités. Une haie dense et correctement implantée constitue un frein efficace à ces processus en ralentissant le ruissellement et en piégeant les sédiments (Awaf, 2020).

L'enracinement des haies joue un rôle central : il améliore l'infiltration en créant des macropores qui guident l'eau en profondeur vers les nappes phréatiques, réduisant ainsi les arrivées massives et simultanées dans les cours d'eau lors d'orages (Bauer & Davin, 2013). De plus, la haie agit comme une barrière physique en retenant les particules de sol en amont, évitant leur entraînement sur de longues distances.

Enfin, certaines haies, en particulier les ripisylves, contribuent à la filtration des polluants : elles interceptent et absorbent une partie des excédents d'azote issus des parcelles agricoles, limitant ainsi le transfert de nitrates vers les eaux superficielles et souterraines (Bauer & Davin, 2013).

¹² Haies contribuant à la présence de petits gibiers, ce qui favorise la pratique de la chasse

3. EFFET BRISE- VENT



Une haie implantée et composée de manière judicieuse permet de réduire l’impact du vent sur les cultures, en limitant les risques de verse (céréales couchées au sol) ou d’échaudage (stress dû aux fortes chaleurs), et offre au bétail un abri efficace contre les intempéries (Awaf, 2020).

Haie brise-vent

La haie brise-vent est généralement constituée de plusieurs strates : buissonnante, arbustive et arborée (haut-jet). Cette structure filtrante atténue la vitesse du vent sans l’arrêter brutalement (Parc naturel régional du Verdon, 2024).

Effet protecteur sur le bétail

Les strates inférieures complètent l’effet brise-vent en limitant les vents froids qui fragilisent les animaux. En protégeant également des pluies froides et du rayonnement solaire excessif, la haie joue un rôle thermorégulateur : elle réduit les pertes énergétiques liées aux conditions climatiques et améliore ainsi la productivité animale (Bauer & Davin, 2013).

Effet protecteur sur les cultures

L’effet brise-vent agit aussi sur les cultures : la réduction de la vitesse du vent entraîne une baisse de l’évapotranspiration et un microclimat plus stable, favorisant la photosynthèse et la productivité. On considère que les rendements augmentent en moyenne de 6 à 20 %, sur une zone équivalente à 10 à 15 fois la hauteur de la haie (Bauer & Davin, 2013). De plus, la haie limite la dérive aérienne des produits phytosanitaires provenant des parcelles voisines, un avantage particulièrement intéressant en agriculture biologique.

4. CLÔTURE EFFICACE



Avant l’apparition du fil barbelé et des clôtures électriques, la haie remplissait essentiellement un rôle de délimitation des parcelles et de clôture pour le bétail. Conduite selon la technique traditionnelle du plessage, qui consiste à incliner et entrelacer les jeunes tiges, elle devient à la fois dense et esthétique, formant une barrière infranchissable (Awaf, 2020).

Implantée avec des essences épineuses et touffues, cette haie constitue une barrière physique qui maintient le bétail dans les parcelles tout en limitant l’intrusion du gibier dans les cultures. Elle assure ainsi une fonction de protection à la fois pour l’élevage et pour les terres agricoles (Parc naturel régional du Verdon, 2024).

5. COMPLÉMENT FOURRAGER



Au-delà de son rôle de clôture et d’abri, la haie peut aussi contribuer à l’alimentation du bétail. Chevaux, bovins, caprins ou ovins broutent volontiers les jeunes pousses d’arbres et d’arbustes. Certains « fourrages ligneux » présentent même une valeur nutritive comparable à celle d’une prairie, ce qui permet de diversifier la ration alimentaire et de compenser une moindre productivité des pâtures, notamment en été, en automne ou lors d’épisodes de sécheresse printanière (Awaf, 2020).

Dans certaines régions, on met en place des haies fourragères, composées d’essences sélectionnées pour leur appétence et leur valeur nutritive. Elles offrent aux troupeaux une ressource complémentaire tout en procurant abri contre le soleil, le vent et la pluie (Parc naturel régional du Verdon, 2024).

6. PRODUCTION DE BIOMASSE



Les haies représentent également une ressource en bois et biomasse. Leurs résidus de taille peuvent être valorisés sous forme de bois de chauffage, de bois raméal fragmenté (BRF) utilisé comme amendement organique, de paillage horticole ou encore de litière pour les animaux. L’Awaf (2020) met particulièrement en avant la production de plaquettes de bois destinées à un usage énergétique, ressource locale et renouvelable.

Historiquement, les haies fournissaient du bois de chauffage grâce à la taille des branches ou à l’étêtage des arbres en têtards, ainsi que du bois d’œuvre par l’abattage de sujets âgés. Une haie conduite en taillis peut produire environ 10 stères de bois pour 100 mètres tous les 15 à 20 ans. Bien gérée à l’échelle d’une exploitation, elle constitue un combustible peu coûteux pour les bâtiments agricoles ou l’habitation (Bauer & Davin, 2013).

Aujourd’hui, la valorisation se modernise : le bois de haie est de plus en plus exploité sous forme de bois déchiqueté, utilisé non seulement pour le chauffage, mais aussi comme paillage, litière animale ou intrant de compostage (Bauer & Davin, 2013).

7. PRODUCTION DE FRUITS



Les haies peuvent également intégrer des arbres fruitiers et petits fruits, offrant une production en intra-parcellaire. Cette option constitue une ressource alimentaire supplémentaire mais doit être envisagée comme une culture à part entière, nécessitant un entretien et des soins spécifiques (Awaf, 2020).

En complément, les haies fruitières fournissent une richesse utile à la fois à l'élevage, dont elles peuvent pallier le manque de fourrage en période de sécheresse, à la faune sauvage, qui trouve dans les baies, les fruits et les fleurs une source de nourriture essentielle, et aux êtres humains, qui valorisent ces productions sous forme de confitures, sirops, tartes ou encore par l'apiculture grâce à la production de miel (Bauer & Davin, 2013).

8. IMPACT PAYSAGER



Au-delà de leurs fonctions productives ou écologiques, les haies présentent un intérêt paysager majeur. Elles constituent un élément naturel qui contribue à façonner et structurer les paysages. Les haies mélangées, par la diversité de leurs essences et de leurs hauteurs, offrent un ensemble plus harmonieux et esthétique, particulièrement lorsqu'elles sont constituées de variétés locales. Elles apportent également une palette de couleurs variées selon les saisons, renforçant l'attrait visuel des campagnes (Parc naturel régional du Verdon, 2024).

Dans les espaces ouverts, comme les plateaux agricoles, les haies brisent la monotonie des grandes cultures. Elles guident le regard et facilitent la lecture de la structure paysagère, tout en améliorant l'attractivité touristique et la qualité de vie des habitants. Leur présence favorise aussi certaines activités récréatives (balade, cueillette, chasse, randonnée) et contribue même à la valeur patrimoniale et identitaire des territoires, comme l'ont montré les représentations artistiques des bocages normands (Bauer & Davin, 2013).

L'intérêt paysager de la haie est encore amplifié lorsqu'elle est intégrée dans un paysage de bocage. Celui-ci se caractérise par une mosaïque semi-ouverte, composée de haies, talus boisés, vergers et arbres isolés, qui délimitent prés et champs. Vu du ciel, ce maillage forme un réseau cohérent d'éléments paysagers typiques. Sur le plan écologique, ce réseau assure une continuité écologique : les haies, reliées aux bosquets, mares ou intersections, fonctionnent à la fois comme corridors écologiques et comme réservoirs de biodiversité (Gillain et al., 2021; Merot et al., 1999; OFB, s. d.)

Pour résumer, cette typologie fonctionnelle montre que la conception d'une haie (composition, structure, densité) et sa situation dans la parcelle (perpendiculaire à la pente, en bordure, etc.) doivent être pensées en amont en fonction des objectifs recherchés. Afin de soutenir cette démarche réflexive et d'encourager la mise en place de haies adaptées aux contextes locaux, la Région wallonne propose aujourd'hui différents subsides et dispositifs d'accompagnement, qui seront détaillés dans la section suivante.

2.2 QUELLES SONT LES HAIES SUBVENTIONNÉES EN RÉGION WALLONNE ?

2.2.1 LES CINQ TYPES DE HAIES SUBVENTIONNÉES

La typologie présentée ci-dessous s'appuie principalement sur les référentiels établis par l' Awaf (2020) et Natagriwal (2024b).

1) Haies vives

Les haies vives correspondent à des plantations linéaires d'arbustes et d'arbres, issus d'essences locales. Elles se distinguent par leur densité et leur capacité à constituer une barrière écologique et paysagère. Selon Natagriwal (2024b), elles doivent comporter au minimum trois espèces différentes, avec une diversité suffisante (aucune espèce ne représentant plus de 50 % des plants). Les haies vives remplissent plusieurs fonctions : structuration du paysage, accueil de biodiversité, rôle de brise-vent, réduction de l'érosion et amélioration de l'infiltration de l'eau.

2) Taillis linéaire

Le taillis linéaire est constitué de plants ligneux recépés régulièrement (coupés à la base à 5-10 cm, rotation de coupe tous les deux ans minimum), ce qui stimule la production de nouvelles tiges. Ce mode de gestion favorise la production de bois de chauffage, biomasse ou BRF (bois raméal fragmenté), tout en maintenant un couvert linéaire. Il combine ainsi des objectifs productifs et écologiques : frein hydraulique, piégeage de sédiments, fourniture de refuge pour la petite faune. Le taillis linéaire est particulièrement adapté aux espèces comme le saule, le charme ou l'aulne.

3) Alignement d'arbres

Les alignements consistent en la plantation d'arbres de haut-jet disposés en ligne le long de parcelles, chemins ou routes. Ils se distinguent par une stratification verticale plus simple (souvent sans strate arbustive) et par leur rôle de structuration paysagère. Historiquement utilisés comme marqueurs de limites parcellaires, ils jouent aussi un rôle de brise-vent et contribuent à la trame écologique. Leur gestion est relativement simple (taille d'entretien, suivi sanitaire des arbres).

4) Arbres têtards

Les arbres têtards résultent d'une taille régulière de la cime à hauteur d'homme, ce qui entraîne la formation d'une « tête » caractéristique, d'où repartent de nouvelles branches. Cette pratique traditionnelle, fréquente en Wallonie, présente un intérêt productif, écologique et patrimonial important (Voir section 2.1.1 point 4).

5) Vergers hautes tiges

Les vergers hautes-tiges sont composés d'arbres fruitiers greffés sur porte-greffe à tronc élevé, ce qui leur confère une hauteur importante et une longévité supérieure aux vergers basse-tige modernes. Ils combinent une fonction productive (fruits destinés à la consommation ou à la transformation) et une fonction écologique (biodiversité arboricole, pollinisateurs, préservation des variétés anciennes). Leur rôle paysager est majeur : ils structurent l'espace rural, renforcent l'identité des terroirs et offrent un maillage écologique complémentaire aux haies.

Ces cinq catégories forment ainsi la typologie officielle des haies éligibles en Région wallonne et servent de base aux dispositifs de subvention à la plantation et à l'entretien.

2.2.2 AIDES POUR LES MESURES AGROENVIRONNEMENTALES ET CLIMATIQUES (MAEC)

1) Les aides à la plantation

Cette **subvention régionale forfaitaire unique** vise à soutenir la plantation de nouveaux éléments linéaires (Natagriwal, 2024b; YesWePlant, 2024). Elle est octroyée uniquement après la plantation et est conditionnée par plusieurs critères :

- Concerner exclusivement des haies nouvellement plantées,
- Utiliser des essences indigènes (Annexe 2),
- Engagement d'entretien pour une période de 30 ans,
- Installation de protection contre le bétail, le gibier ou la faune si nécessaire,
- Interdiction de paillage non biodégradable,
- Pas d'épandage de produits phytosanitaires à moins d'1 mètre de distance des pieds des éléments,
- Respect strict du calendrier d'entretien pour éviter toute nuisance pour la biodiversité : hors période du 1^{er} avril au 31 juillet.

Les conditions d'éligibilité détaillées, ainsi que les recommandations relatives à la plantation et à l'entretien figurent en Annexe 3.

Types de plantation concernées

- a) Les haies vives

Constituées d'arbustes ou d'arbres plantés à faible distance les uns des autres, sur un ou plusieurs rangs. Elles peuvent être conduites librement ou taillées tout en préservant leur pérennité, et forment un cordon dense d'une largeur maximale de 10 m.

b) Les taillis linéaires

Plantation d'un ou plusieurs rangs d'arbres ou arbustes, également d'une largeur maximale de 10 m, destinée à être recépée. Ce type de haie doit comporter au minimum trois essences, sans qu'aucune ne représente plus de 50 % du nombre total de plants.

c) Les vergers à hautes tiges

Plantation d'arbres fruitiers de variétés anciennes conduits en haute-tige (tronc d'au moins 1,80 m). Cette plantation n'est pas nécessairement linéaire.

d) L'alignement d'arbres

Ensemble d'arbres plantés en une ou deux rangées continues.

Méthode de calcul

Les montants de subvention sont multipliés par 1,5 lorsque les travaux sont réalisés par une entreprise spécialisée. Le remboursement est plafonné à 80% du montant total des factures.

Plantations	Montants
Alignements d'arbres	<ul style="list-style-type: none"> • 6 € par arbre acheté en pépinière • 2 € par bouture de saule
Vergers	<ul style="list-style-type: none"> • 25 € par arbre
Haies	<ul style="list-style-type: none"> • 5 € par mètre dans le cas d'une plantation mono rang • 7 € par mètre dans le cas d'une plantation en deux rangs • 9 € par mètre dans le cas d'une plantation en trois rangs et plus avec un maximum de 10 mètres de largeur
Taillis linéaire	<ul style="list-style-type: none"> • 1,50 € par mètre dans le cas d'une plantation mono rang • 4 € par mètre dans le cas d'une plantation en trois rangs et plus avec un maximum de 10 mètres de largeur
Entretien arbres têtards	<ul style="list-style-type: none"> • 20 € par arbre traité en "têtard"

Tableau 2 : Montants forfaitaires pris en charge par la région wallonne pour les plantations et les entretiens (YesWePlant, 2024)

2) Eco-régime : Maillage écologique

L'éco-régime « maillage écologique » est un dispositif d'aide directe de la PAC 2023-2027 (SPW, s. d.).

À partir de 2025, le dispositif MAEC (Mesure Agro-Environnementale et Climatique) dit « éléments du maillage » regroupant les haies et les alignements d'arbres, les arbres isolés et les mares, peut être converti en éléments topographiques éligibles à l'éco-régime « maillage écologique ».

Il s'agit d'une **aide financière annuelle** conditionnée par :

- Le respect de la BCAE 8 (maintien de tous les éléments topographiques (haies, alignement d'arbres, bosquets...) et interdiction de tailler les haies et les arbres durant la période de nidification et de reproduction des oiseaux (pas de taille du 1^{er} avril au 31 juillet),
- Éléments situés sur les surfaces agricoles ou sur la mitoyenneté de l'exploitation,
- Interdiction d'épandage de produits phytosanitaires à moins d'1 mètre de distance des pieds des éléments,
- Prise en compte par tranches de 10 mètres de longueur,
- Peuvent être prises en compte dès leur première année d'implantation,
- Haies ornementales non éligibles (résineux ou espèces exotiques).

Cette subvention est basée sur une approche volontaire des agriculteurs et fait l'objet d'une déclaration annuelle. Elle est non cumulative sur les mêmes éléments déclarés pour une autre subvention. Lors de la déclaration de superficie de la PAC, toutes les mesures d'éléments paysagers éligibles (haies, arbres, bosquets, ...) sont ramenées à une même unité de mesure : l'hectare environnemental (HE).

Définition des haies éligibles

Une haie est considérée comme éligible si elle répond aux critères suivants :

- Composée d'essences de feuillus indigènes (Annexe 2),
- Présente une longueur continue d'au moins 10 m (avec un maximum de 5 m d'espace vide entre les couronnes),
- Largeur inférieure ou égale à 10 m entre les pieds extérieurs,
- Couronnes jointives au sein des tronçons.

Méthode de calcul

La prime de base est fixée à 450 €/HE (hectare environnemental), avec un coefficient de 0,001 HE par mètre linéaire appliqué aux haies et alignements d'arbres, soit une aide de 0,45 €/mètre. Une majoration de 50 % est accordée pour les haies situées en zone Natura 2000 ou dans un Site de Grand Intérêt Biologique (SGIB).

ANALYSE DES TYPES DE HAIES ET CLASSIFICATION SELON UNE CLÉ DE LECTURE HYDROLOGIQUE

2.3 LES DIFFÉRENTS RÔLES D'UNE HAIE DU POINT DE VUE HYDROLOGIQUE

2.3.1 INTERCEPTION DES PLUIES

Le rôle des haies dans l'interception des pluies constitue un facteur clé de leur influence sur le cycle hydrologique. Elles modifient la distribution spatiale des précipitations et influencent ainsi le bilan hydrique des sols (Ghazavi et al., 2008).

Dès l'arrivée de la pluie, le couvert végétal intercepte une partie des précipitations sur ses surfaces (feuillage, écorce) et en restitue ensuite une grande partie à l'atmosphère par évaporation. On estime qu'environ 80 % de l'eau interceptée ne parvient jamais au sol (Bansept, 2013; Bréda, 2003). Les arbres et, par extension, les haies se situent à l'interface entre l'air et le sol, jouant un rôle significatif dans ce processus du cycle de l'eau.

Les principaux facteurs qui conditionnent cette interception sont : l'architecture et la densité du couvert végétal, la surface du feuillage disponible pour l'échange eau-atmosphère, l'état de croissance de la végétation ainsi que les conditions climatiques (notamment l'intensité et la fréquence des pluies) (Bansept, 2013).

Des études menées en Europe ont permis de quantifier cette capacité. En France (Bretagne), Ghazavi et al. (2008) ont montré que des haies bocagères arborées implantées sur talus interceptaient en moyenne 28 % des précipitations en période feuillue et 12 % en période défeuillée, avec une influence hydrologique perceptible jusqu'à 9 m en amont et 6 m en aval des haies. À l'inverse, dans le sud du Royaume-Uni, Herbst et al. (2006) ont observé que des haies mixtes agricoles taillées présentaient une capacité de stockage moyenne beaucoup plus faible, de 2,6 mm en été et 1,2 mm en hiver pour des haies de 3 à 4 m de haut et 2 m de large, n'entraînant qu'un léger retard dans l'humidification des sols. Cette comparaison souligne que la structure et la gestion des haies conditionnent fortement leur capacité d'interception des pluies.

À l'échelle d'un bassin versant présentant une densité de haies de 20 % et une zone d'influence d'environ 15 m, l'interception peut réduire les apports de pluie efficaces de 2,6 à 5,6 % selon la période de croissance (Ghazavi et al., 2008).

Bansept (2013) souligne, dans sa synthèse sur les flux d'eau (Figure 19), que de manière générale, les arbres feuillus interceptent 15 à 45% des précipitations. Ces valeurs correspondent à des ordres de grandeur moyens issus de la littérature et doivent être considérées comme indicatives car en réalité la proportion interceptée varie fortement selon l'intensité et la durée de la pluie, des conditions climatiques et des caractéristiques du couvert végétal.

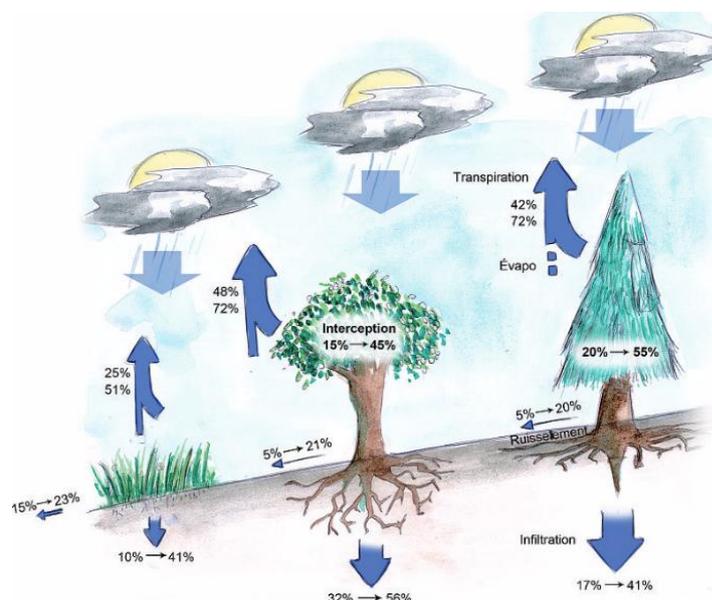


Figure 19 : Synthèse des flux d'eau d'après différentes sources bibliographiques (Bansept, 2013)

Ces différentes études mettent en évidence que l'interception constitue un mécanisme essentiel dans l'évaluation du rôle hydrologique des haies. En réduisant la quantité d'eau atteignant directement le sol, elles participent à la diminution du ruissellement immédiat, au retard des pics de crue et à la régulation de la recharge des sols et des nappes (Bansept, 2013; Ghazavi et al., 2008).

2.3.2 INFILTRATION DE L'EAU DANS LE SOL

L'infiltration désigne le processus par lequel l'eau issue des précipitations ou du ruissellement pénètre dans le sol sous l'effet de la gravité. On distingue trois grandes formes principales d'eau dans le sol :

1. L'eau libre (ou gravitaire) qui circule rapidement dans les macropores et rejoint les horizons profonds ou les écoulements latéraux,

2. L'eau capillaire (ou liée) retenue dans les micropores par tension et constituant la principale réserve utile pour la végétation,
3. L'eau hygroscopique et de constitution qui sont fortement liées aux particules minérales et indisponibles pour les plantes (Hillel, 1998; Ridremont et al., 2012).

Le tableau de Ridremont et al. (2012) illustre ces différents types d'eau du sol en fonction de la porosité, de l'accessibilité biologique, de la rétention et du type d'humidité (Figure 20). L'équilibre entre ces différents compartiments détermine la dynamique hydrique des sols et leur capacité à absorber, stocker et restituer l'eau.

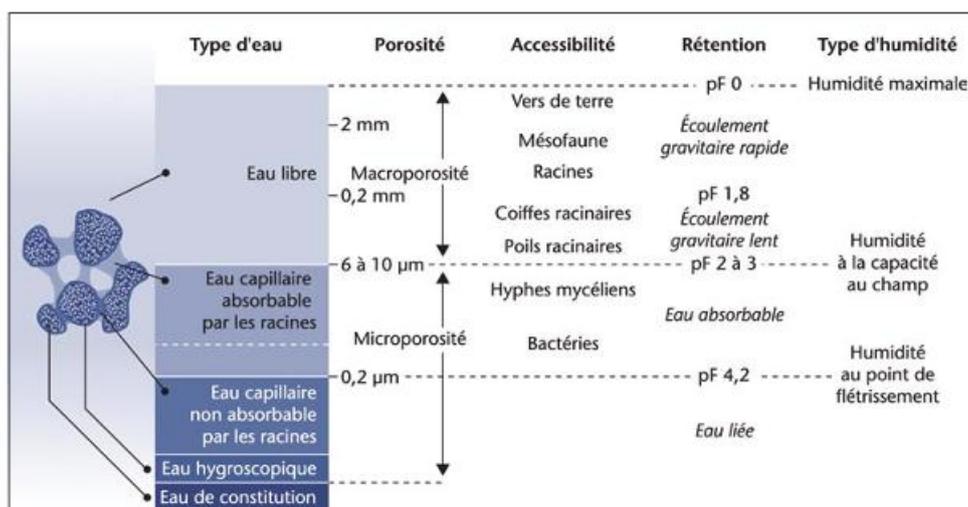


Figure 20 : Principaux types d'eau du sol en fonction de la porosité, de l'accessibilité biologique, de la rétention et du type d'humidité (Ridremont et al., 2012)

La vitesse d'écoulement de l'eau dans le sol dépend du degré d'humidité, de la texture des horizons et de la densité racinaire (porosité). Ce déplacement est régi par le gradient hydraulique : l'eau s'écoule toujours des zones de potentiel hydraulique le plus élevé (zone plus humide) vers celles de potentiel plus faible (zone plus sèche) (Bansept, 2013; Hillel, 1998).

En plus des flux verticaux, l'eau peut également circuler latéralement dans les horizons superficiels lorsque sa descente est freinée par une couche imperméable ou temporairement saturée. Ces flux hypodermiques horizontaux ou écoulements de subsurface constituent une voie de transfert rapide vers les cours d'eau, en particulier lors des épisodes pluvieux intenses ou en contexte de sols hydromorphes (Ghazavi et al., 2008).

Ces écoulements jouent un rôle majeur dans la formation des crues, même si leurs origines restent multiples et encore débattues dans la littérature (Beckers & Degré, 2011). Dans ce contexte d'inondations, les haies jouent un rôle déterminant. Par leur système racinaire dense, elles créent des macropores qui facilitent l'infiltration verticale et la redistribution de l'humidité au sein des différents horizons. De plus, leur apport en

matière organique et leur influence sur la structure du sol renforcent la porosité et la capacité de rétention en eau. Ces processus favorisent à la fois la recharge locale des sols et la régulation des transferts latéraux (Viaud & Thomas, 2019).

2.3.3 FREIN HYDRAULIQUE

Les haies assurent un rôle de frein hydraulique en influençant la circulation de l'eau. Elles permettent de ralentir les écoulements de surface. Viaud & Thomas (2019) précisent que la présence de haies génère une rugosité de surface par la formation de microreliefs, ce qui favorise la retenue et l'absorption de l'eau. Ce rôle est assuré à la fois par les troncs, les tiges, la végétation herbacée et la litière de feuilles mortes (Bansept, 2013; Wallace et al., 2021)

Le rôle des haies comme élément tampon lors d'une montée des eaux à l'échelle du paysage s'avère efficace surtout lors des événements pluvieux fréquents et de faible intensité. La présence de haies bocagères agit comme un frein naturel, ralentissant les écoulements et diminuant le volume d'eau ruisselé grâce à l'amortissement dû à la végétation (Viaud & Thomas, 2019). En ralentissant la vitesse des écoulements, les haies dissipent également une partie de l'énergie de l'eau, ce qui limite son pouvoir érosif (Richet et al., 2019).

Dans le cas d'épisodes plus rares de précipitations intenses, l'effet des structures ligneuses est moins marqué : la saturation très rapide de la couche superficielle des sols conduit à un ruissellement généralisé sur l'ensemble de la zone (Viaud et al., 2005 ; Viaud & Thomas, 2019).

L'efficacité d'un réseau de haies à freiner le ruissellement dépend avant tout de la continuité de sa trame bocagère et de son organisation spatiale au sein du paysage. Son positionnement par rapport aux chemins d'écoulement et à la pente, ainsi que son interaction avec d'autres réseaux anthropiques influencent les échanges hydrologiques entre les différentes zones du paysage et les cours d'eau. Ces effets dépendent également de l'intensité des précipitations et de la rugosité du sol (Merot et al., 1999 ; Viaud & Thomas, 2019).

Les forces de frottement exercées par la densité des tiges des arbustes et la présence de feuillage s'expriment par le coefficient de Manning (voir section 3.2.2). Ce coefficient traduit la rugosité induite par la végétation qui retarde la vitesse d'écoulement et amortit les pics de crue. En réduisant la vitesse des flux de surface, les haies contribuent également au piégeage progressif des sédiments (Ouvry et al., 2012 ; Richet et al., 2017).

2.3.4 DÉPÔT DE SÉDIMENTS

Le dépôt de sédiments au niveau des haies est un phénomène qui se matérialise sur le long terme par une redistribution des sols sous l'effet de l'érosion. Le processus de sédimentation débute par le détachement des particules de sol lorsque l'énergie cinétique des gouttes de pluie est supérieure à la force de cohésion du sol. Les particules arrachées sont ensuite transportées par l'action d'un agent de transport (eau, vent, glace, gravité,

travail du sol, arrachage des cultures) à des distances plus ou moins grandes. Enfin, la particule de sol est déposée lorsque la capacité de transport n'est plus suffisante (Dautrebande, 2006).

En réduisant la vitesse des flux de surface, les haies favorisent la décantation et le dépôt des particules grossières en amont de leur linéaire, jouant ainsi un rôle de filtre naturel (Merot et al., 1999; Richet et al., 2017).

Pour des haies parallèles aux courbes de niveau et implantées sur des talus, l'organisation des sols se configure par rapport à leur localisation. Des recherches en Bretagne ont mis en évidence un épaissement de l'horizon humifère en amont, pouvant atteindre jusqu'à 1 m sous haie, et une diminution de cette épaisseur de sol en aval (Figure 21). Ce phénomène traduit une érosion plus marquée directement en aval des haies ainsi qu'une érosion observée en haut de versant, provoquant un appauvrissement des sols dans ces zones spécifiques et une accumulation de sédiments en amont de la haie (Dautrebande, 2006; Viaud et al., 2009).

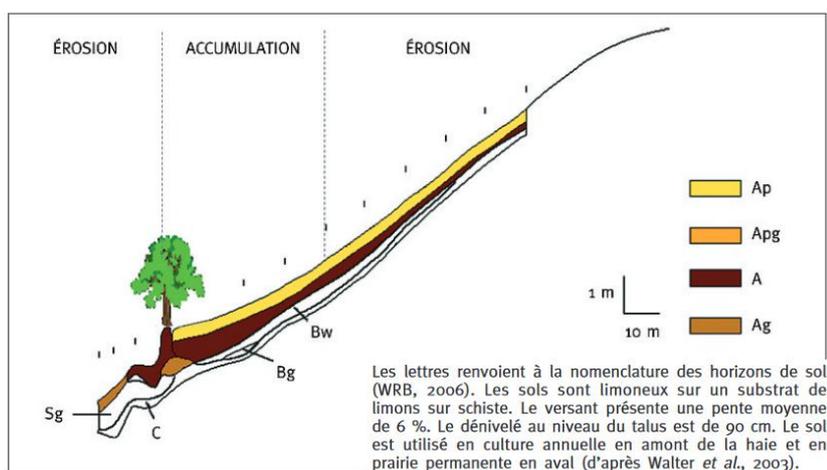


Figure 21 : Organisation des horizons de sol le long d'un versant présentant une haie dans le Massif armoricain (Walter et al. (2003) cité par Viaud et al., (2009))

Grâce à ces zones d'accumulation en amont, les haies permettent de limiter le transfert de sédiments vers les cours d'eau en aval (Viaud et al., 2009). Elles participent également à l'amélioration de la qualité de l'eau en réduisant le transport de particules fines, souvent porteuses de phosphore et de produits phytosanitaires (Dautrebande, 2006).

Ce phénomène d'érosion brutale en aval d'une haie peut être interprété comme une forme de « compensation hydraulique ». Ce concept illustre l'idée que l'eau, après avoir été déchargée de ses particules sédimentaires par la haie, conserve une énergie suffisante pour se recharger en sédiments juste après son filtrage, provoquant ainsi une reprise de l'érosion immédiatement après le passage de la haie (Dautrebande, 2006; Viaud et al., 2009).

2.4 FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE D'UNE HAIE

Les haies régulent les écoulements à travers l'action combinée des propriétés physiques du sol ainsi que de leurs caractéristiques hydrologiques, réparties entre la partie aérienne, la surface et la partie souterraine (Figure 22). L'ensemble de ces processus constitue le bilan hydrologique en rendant compte des échanges d'eau entre la haie, le sol et l'atmosphère.

2.4.1 SCHÉMATISATION

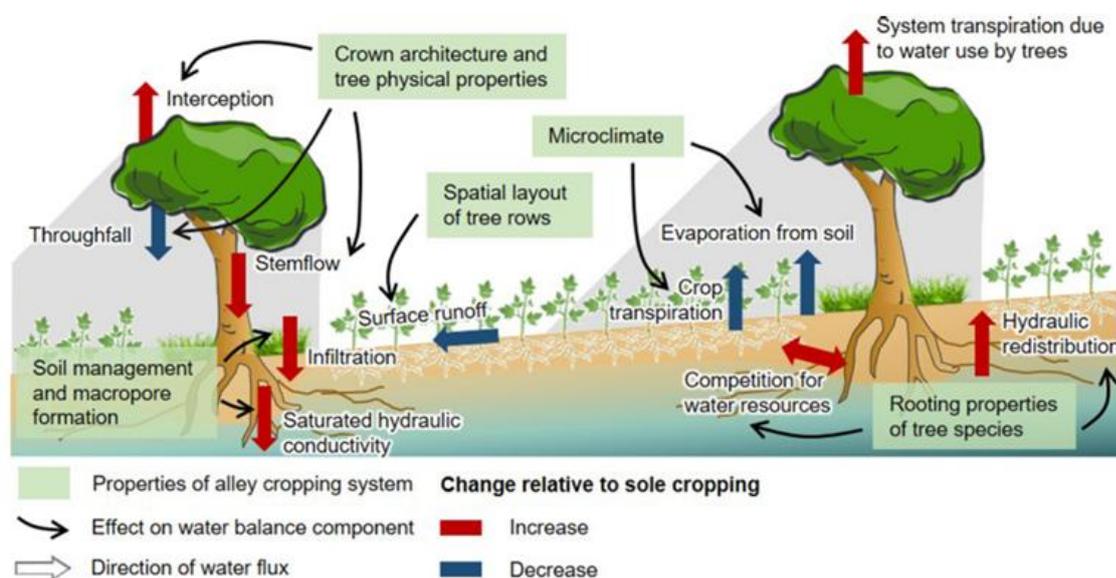


Figure 22 : Illustration du fonctionnement hydrologique d'un système agroforestier. Les encadrés verts représentent les propriétés de la structure arborée qui influencent les flux d'eau. Leurs effets sont indiqués par des flèches noires. Les flèches rouges et bleues indiquent la direction des flux hydriques (composantes du bilan), la couleur traduisant une augmentation (rouge) ou une réduction (bleu) par rapport à une culture classique (Jacobs et al., 2022).

La figure 22 illustre le fonctionnement hydrologique d'un dispositif agroforestier, représenté ici par une formation arborée en allées, accompagnée d'un couvert herbacé (Jacobs et al., 2022).

Ces processus sont facilement transposables aux haies, dont la structure linéaire et le fonctionnement hydrologique sont similaires. Sur cette Figure 22, on distingue trois compartiments principaux :

1. La partie aérienne caractérisée par l'interception des pluies et l'évapotranspiration,
2. La surface, où la rugosité végétale contribue à ralentir le ruissellement et à favoriser l'infiltration,
3. La partie souterraine où se déroulent l'infiltration et la conductivité hydraulique, le système racinaire jouant un rôle central dans la structure du sol et la redistribution de l'eau.

2.4.2 CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DU SOL

Les paramètres hydrauliques du sol sont étroitement liés aux propriétés physiques du sol, en particulier à sa texture et sa structure. Ces propriétés déterminent la taille, la connectivité et la répartition des pores, influençant ainsi la conductivité hydraulique et la teneur en eau du sol (J. Ma et al., 2024).

1) La texture

La texture du sol est définie par la proportion des différentes fractions minérales qui le composent.

Ces composants minéraux sont regroupés en quatre classes de particules selon leur taille : les graviers (> 2 mm), les sables (50 μm – 2 mm), les limons (2 - 50 μm) et les argiles (< 2 μm) (Calvet, 2013; Hillel, 1998).

Trois classes granulométriques sont utilisées pour caractériser la texture d'un sol :

1. Sable (Sand)
2. Limon (Silt)
3. Argile (Clay)

Elles peuvent être représentées dans un triangle textural (Figure 23), le loam étant considéré comme un mélange équilibré des trois classes.

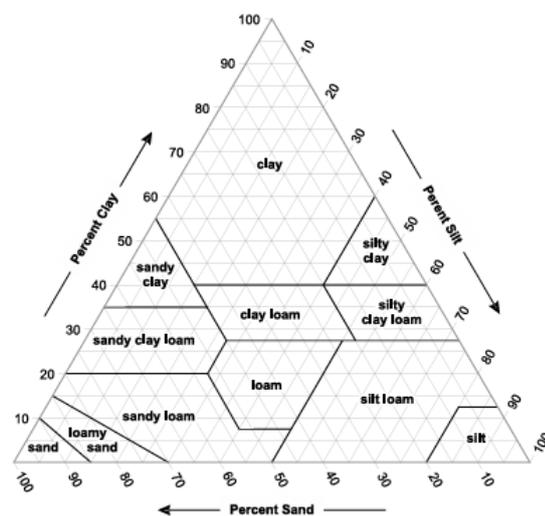


Figure 23 : Triangle textural du sol représentant les pourcentages d'argile, de limon et de sable pour les 12 classes texturales de base (USDA, 2017).

Celui-ci permet de déterminer la classe texturale en fonction du pourcentage occupé par chacune de ces fractions minérales. Par exemple, un sol classé argilo-limoneux sera composé de 70% de limon et 30% d'argile avec une très faible proportion de sable.

La texture du sol influence fortement ses propriétés hydriques selon la nature, la forme et la taille des grains qui le composent. Par exemple, les sols sableux laissent infiltrer rapidement l'eau mais la retiennent peu, tandis que les sols argileux conservent davantage d'eau mais la rendent moins disponible pour les plantes. Les sols limoneux occupent une position intermédiaire en combinant une bonne capacité de rétention et une circulation plus aisée de l'eau. Toutefois, en raison de la faible cohésion des particules minérales, ils sont particulièrement sensibles à l'érosion, surtout sur les versants agricoles (Dautrebande, 2006; Hillel, 1998).

Ces caractéristiques texturales influencent également le développement et le rôle hydrologique des haies. Les sols argileux, par leur compacité et leur forte capacité de rétention en eau, peuvent limiter la croissance racinaire, avec en cas extrême un risque d'asphyxie si le sol est mal drainé. À l'inverse, les sols sableux, plus légers et mieux drainés, favorisent l'enracinement, mais peuvent exposer la végétation à un stress hydrique en saison sèche.

2) La structure

La structure du sol désigne l'agencement des particules minérales (sables, limons, argiles) et des matières organiques qui, en s'associant, forment des agrégats. Cette organisation détermine l'existence et la disposition des pores, c'est-à-dire des espaces vides (appelés espaces poraux) qui hébergent l'eau, l'air et une grande diversité d'organismes vivants. La structure conditionne ainsi les propriétés physiques essentielles du sol, notamment l'infiltration, l'aération et la rétention en eau (Calvet, 2013).

La structure, contrairement à la texture, est une propriété plus dynamique. Elle peut être modifiée par l'activité biologique (racines, lombrics, champignons, ...), les apports organiques ou encore les pratiques agricoles (travail du sol, tassements, ...). Trois composantes majeures permettent de caractériser la structure du sol : la masse volumique apparente, la porosité et la matière organique.

Masse volumique apparente

La masse volumique apparente (ρ_b) correspond au rapport entre la masse de sol sec et le volume total de l'échantillon de sol prélevé (solide et vide compris). Elle s'exprime en g/cm^3 et constitue un indicateur couramment utilisé pour évaluer l'état de compaction d'un sol : plus la valeur est élevée, moins il existe de pores pour stocker l'air et l'eau. Comme la valeur de référence de la masse volumique des solides minéraux purs est d'environ $2,65 \text{ g/cm}^3$ (Calvet, 2013), toute valeur inférieure traduit la présence d'un espace poral plus important.

Cette notion est parfois source de confusion en raison de la traduction de l'anglais « bulk density » qui correspond en réalité à la masse volumique apparente, tandis que la notion de densité apparente, au sens strict, désigne un rapport sans unité entre la masse volumique apparente du sol et la masse volumique de l'eau à 4°C (1000kg/m^3) (Calvet, 2013).

La masse volumique apparente varie selon la profondeur, la localisation par rapport à la haie (sous la haie ou en zone adjacente) et le type de sol. En général, les sols situés sous les haies présentent une masse volumique plus faible et un stockage en carbone organique plus élevé que les sols cultivés voisins (Van Den Berge et al., 2021; Walter et al., 2003).

Porosité

La porosité désigne la proportion de vides présents dans un volume de sol. Elle se définit comme le rapport entre le volume des pores et le volume total du sol. On distingue la porosité texturale, liée à l'arrangement des particules minérales, et la porosité structurale issue de l'agrégation et de l'activité biologique (Calvet, 2013).

La porosité de sol peut être décrite en fonction de la dimension des pores. Selon la classification proposée par Greenland (1977) et reprise par Hillel (1998), on distingue trois catégories :

1. **Les micropores (<0,2 μm)** qui retiennent fortement l'eau par capillarité, la rendant indisponible pour les plantes,
2. **Les mésopores (0,2 - 50 μm)** qui stockent l'eau utilisable et constituent la principale réserve hydrique des plantes,
3. **Les macropores (> 50 μm)** qui favorisent l'infiltration et le drainage rapide par gravité, mais retiennent peu d'eau.

L'agencement des particules en agrégats conditionne la répartition des pores. Des agrégats compacts retiennent surtout l'eau dans des micropores peu accessibles, ce qui peut limiter la croissance racinaire. À l'inverse, les agrégats plus petits et aérés favorisent une circulation de l'eau plus efficace et une meilleure disponibilité pour la végétation (Hillel, 1998).

La porosité détermine directement la disponibilité en eau du sol en fonction du degré de remplissage de ses pores. Comme illustré à la Figure 24, lorsque la teneur en eau est trop faible, les pores ne contiennent plus qu'une eau fortement retenue. On atteint alors l'humidité au point de flétrissement permanent (H_{pf}) et l'eau n'est plus disponible pour les plantes. A l'inverse, lorsque les pores se remplissent après une pluie par exemple, l'eau devient progressivement disponible. La réserve utile (RU) se constitue et correspond alors à la quantité d'eau comprise entre l'humidité à la capacité au champ (H_{cc}) et celle au point de flétrissement (Calvet, 2013).

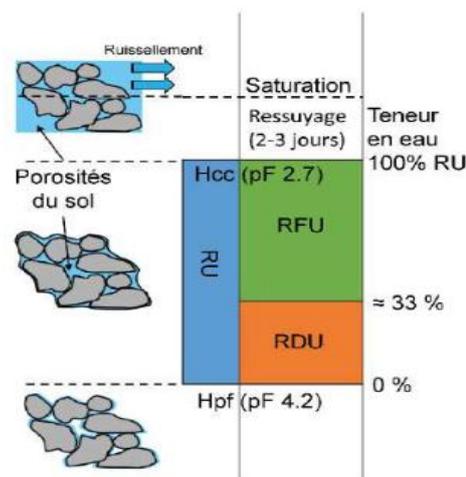


Figure 24 : Illustration du remplissage en eau du sol en fonction de la porosité et définition de la réserve utile (Amline, 2019).

La réserve utile (RU) se divise en deux compartiments : la réserve facilement utilisable (RFU), où la plante peut puiser sans peine l'eau dont elle a besoin, et la réserve difficilement utilisable (RDU) mobilisable au prix d'une dépense énergétique en cas de stress hydrique. Enfin, si les pores du sol dépassent leur capacité de rétention alors le sol devient saturé et l'excédent d'eau s'évacuera par ruissellement (Figure 24) (Calvet, 2013).

Les haies influencent principalement la porosité structurale en augmentant la proportion de macropores grâce au développement racinaire, aux apports organiques et à l'activité de la faune du sol. Ce processus améliore l'infiltration, la conductivité hydraulique et la stabilité de la structure (J. Ma et al., 2024), tout en contribuant à accroître la réserve utile disponible pour la végétation (Hillel, 1998).

Matière organique

La matière organique du sol regroupe l'ensemble des organismes vivants (micro-organismes, faune et racines) ainsi que la litière, constituée des résidus végétaux (feuilles, brindilles, restes de culture,) et des restes d'animaux morts. Suite à un processus de décomposition, la matière organique dégradée constitue une source de carbone organique et de minéraux indispensables aux organismes du sol, stimulant ainsi l'activité biologique.

La litière forme en surface une couche poreuse de matériaux organiques qui filtre et diffuse, limitant ainsi l'assèchement du sol. Au fur et à mesure de sa décomposition, cette litière se transforme en humus qui constitue, avec la partie minérale, les racines et les organismes vivants, la base de l'horizon de surface (couche arable) (Archambeaud, 2023; Calvet, 2013).

En influençant directement la structure du sol, la matière organique (MO) agit comme un agent de cohésion. Les racines, les résidus organiques et la faune du sol participent à la formation de micro-agrégats, tandis que les substances humiques issues de la décomposition jouent un rôle de ciment en se liant aux particules minérales, notamment aux argiles. Cette interaction favorise la formation et la stabilisation d'agréats, qui, à l'échelle macroscopique, apparaissent sous forme de « mottes » dans le profil pédologique. Ce processus accroît la macroporosité, améliore la capacité de rétention en eau, favorise l'aération du sol et renforce la circulation de l'eau dans le profil (Archambeaud, 2023; Hillel, 1998).

La matière organique peut également jouer un rôle important dans la capacité de rétention de l'eau dans le sol par son interaction avec la texture du sol. Le tableau 3 issu des travaux de Hudson (1994) et cité par Archambeaud (2023), illustre l'action conjointe de ces deux paramètres sur la quantité d'eau stockée.

Quantité d'eau stockée dans un sol en fonction de la texture et du taux d'humus (En litre d'eau par mètre de profondeur)			
Matière organique	Sable	Limon	Argile
1%	83	158	117
2%	117	200	150
3%	142	242	183
4%	175	292	217
5%	208	333	250

Tableau 3 : Quantité d'eau stockée dans un sol en fonction de la texture et du taux d'humus (Hudson, JSWC (1994) cité par Archambeaud (2023)).

Ce tableau illustre que l'augmentation du taux de matière organique (MO) accroît significativement la capacité de stockage de l'eau, quelle que soit la texture du sol.

Par exemple, un sol sableux contenant 5% de MO peut retenir jusqu'à 208 l/m, soit davantage qu'un sol argileux pauvre en matière organique (117l/m avec seulement 1% de MO). Ce qui montre qu'un sol réputé drainant, lorsqu'il est enrichi en matière organique, peut stocker plus d'eau qu'un sol de meilleure rétention mais faiblement pourvu en matière organique.

La matière organique intervient également dans la composition des profils de sol et constitue un élément indispensable pour leur fertilité. Au fur et à mesure de sa transformation, elle s'incorpore sous forme d'humus dans les couches plus profondes, contribuant à différencier les horizons. Sa répartition verticale qui décroît avec la profondeur, influence directement la structure, la porosité, la rétention en eau et la conductivité hydraulique du sol. L'ensemble de ces horizons superposés constitue le profil de sol (Figure 25).

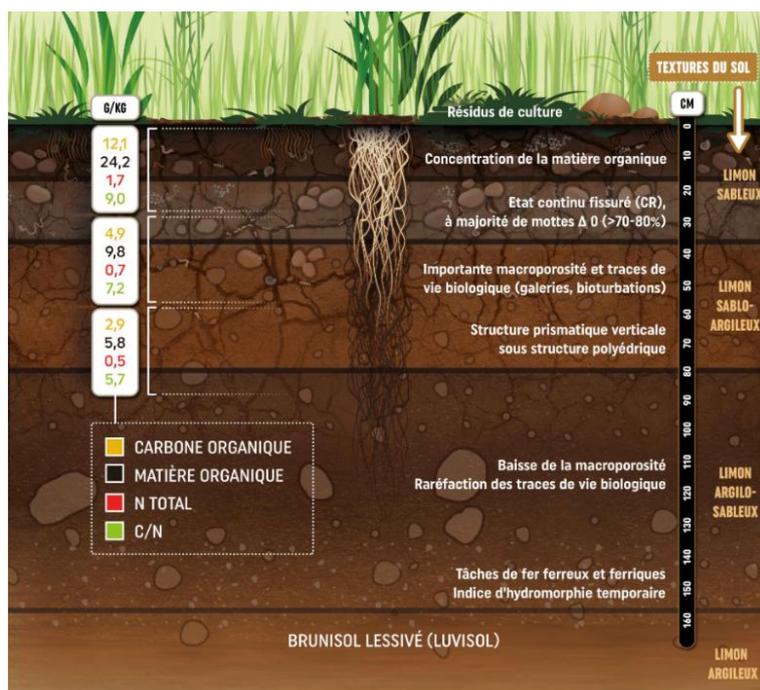


Figure 25 : Répartition de la matière organique au sein d'un profil de sol (Duchène, 2019)

Cette illustration met en évidence la concentration de matière organique dans les premiers horizons du sol. Celle-ci s'appauvrit progressivement, passant de 24 g/Kg dans l'horizon humifère à 5,8 g/kg plus en profondeur.

Dans ce contexte, les haies jouent un rôle majeur car elles enrichissent les horizons superficiels en MO grâce à l'apport de litière foliaire, de racines fines et à l'activité biologique qu'elles stimulent. Cet enrichissement améliore la structure du sol par rapport aux zones cultivées voisines en favorisant l'infiltration et la disponibilité en eau pour la végétation (Cardinael et al., 2018 ; Van Den Berge et al., 2021).

2.4.3 CARACTÉRISTIQUES HYDROLOGIQUES

Les haies exercent une influence hydrologique qui se manifeste simultanément à travers trois compartiments interdépendants : l'air, la surface et le sol. Leur rôle s'exprime tant par les échanges gazeux et l'interception de l'eau que par la régulation des écoulements de surface et l'amélioration des propriétés pédologiques.

PARTIE AÉRIENNE

Évapotranspiration potentielle et réelle

L'évapotranspiration est un phénomène qui regroupe à la fois la transpiration de la végétation et l'évaporation des surfaces d'eau libre et des sols. Ces deux processus, difficilement dissociables, constituent le flux de vapeur d'eau transféré vers l'atmosphère (Bansept, 2013; Degré et al., 2024).

L'évapotranspiration peut se décliner de plusieurs manières (Allen et al., 1998) :

1. **L'évapotranspiration potentielle (ETP)** représente le taux d'évapotranspiration maximale d'une surface végétale qui pourrait se produire si la disponibilité en eau dans le sol n'était pas un facteur limitant. Elle est principalement déterminée par la demande atmosphérique en eau et est une notion théorique qui permet d'évaluer les besoins en eau des cultures dans des conditions idéales.
2. **L'évapotranspiration de référence (ET₀)** correspond à l'évapotranspiration d'une surface de référence (gazon taillé à 12cm), uniformément développée et bien alimentée en eau. Il s'agit d'une référence standard introduite par la FAO qui fournit une valeur de base indépendante du type de culture. Comme l'ETP, elle ne dépend que du climat et est calculée à partir des données météorologiques en utilisant l'équation de Penman-Monteith, seule méthode recommandée par la FAO pour déterminer l'ET₀ (Allen et al., 1998).

L'ET₀ est une forme standardisée de l'ETP, utilisée pour faciliter les comparaisons entre différentes localisations et périodes, car elle se réfère toujours à la même surface hypothétique (le gazon de référence).

3. **L'évapotranspiration maximale (ETM) ou évapotranspiration culturale (ETc)** est influencée par la valeur du **coefficient cultural (Kc)**. Ce dernier reflète les caractéristiques spécifiques de la canopée étudiée. Cette évapotranspiration varie en fonction des différents stades de développement végétal, du type d'arbres de la haie, de la hauteur et densité du couvert ainsi que de la structure du feuillage. L'ETM est l'ETP ajustée aux arbres de la haie dans des conditions optimales. (Guyot, 2013 ; Viaud et al., 2005)
4. **L'évapotranspiration réelle (ETR)** représente la quantité d'eau effectivement transférée de la surface du sol et de la végétation vers l'atmosphère (Allen et al., 1998). Contrairement à l'ETP, l'ETR ne représente pas un état maximal théorique, mais bien celui observé en conditions réelles, témoignant de l'état d'humidité du sol. Son intensité est directement limitée par la disponibilité en eau. Si la

réserve hydrique du sol est faible, l'ETR diminue, ce qui limite la croissance végétale (Ridremont et al., 2012).

Elle peut être exprimée comme l' ET_0 ajustée à la spécificité du couvert végétal (K_c) soumis à un stress hydrique (K_s), selon la relation : $ETR = ET_0 \times K_c \times K_s$.

Ces relations sont synthétisées dans la Figure 26, adaptée de la FAO 56 (Allen et al., 1998)

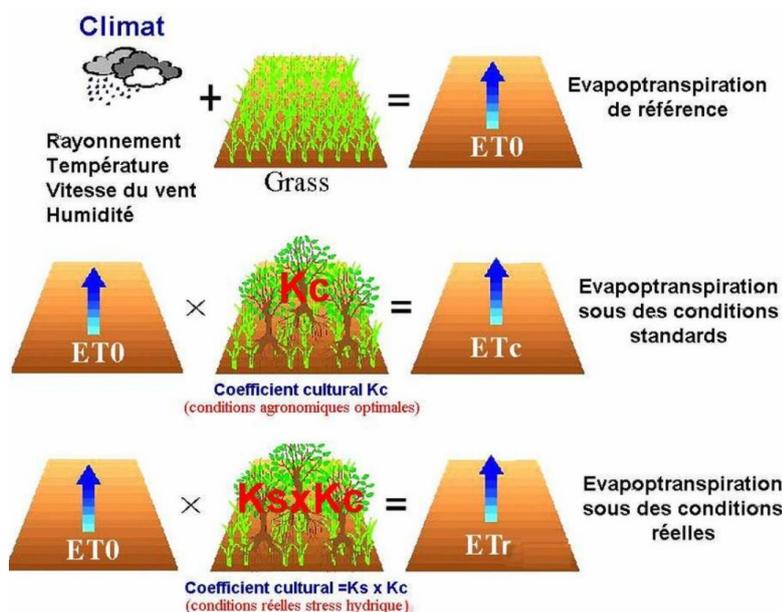


Figure 26 : Types d'évapotranspiration selon la FAO 56 (Allen et al., 1998) adapté par Benhadj (2009).

L'évapotranspiration réelle dépend à la fois des conditions climatiques (rayonnement, température, humidité, vent), de la réserve en eau du sol et des caractéristiques structurales du couvert, comme le type de végétation, son âge et sa densité (Bansept, 2013). Elle est également influencée par l'indice foliaire (surface de feuilles exprimée par unité de surface de sol), et par la conductance stomatique (capacité des stomates à réguler les échanges gazeux avec l'atmosphère) (Guyot, 2013). Cette conductance varie au cours de l'année, notamment chez les espèces à feuilles caduques, dont la surface foliaire fluctue selon les saisons, entraînant ainsi des variations de l'ETR (Viaud et al., 2005). Comparativement aux autres types de couvert végétal, les forêts apparaissent comme l'occupation du sol la plus évapotranspirante, avec des flux pouvant atteindre jusqu'à deux fois ceux des cultures et 1,5 fois à ceux des prairies (Bansept, 2013). Toutefois, lorsque le LAI atteint des valeurs élevées, il ne constitue généralement plus un facteur limitant : l'évapotranspiration est alors principalement contrôlée par les conditions climatiques et la disponibilité en eau du sol (Bréda & Granier, 1996).

À l'échelle des haies, Viaud et al. (2009) montrent que celles situées en bas de versant, proches de la nappe, présentent une activité évapotranspirante très dynamique du printemps à l'automne. En été, elles prélèvent de grands volumes d'eau dans la zone racinaire, générant un noyau sec de 6 à 10 m de chaque côté et une dépression de nappe superficielle, retardant la re-saturation automnale des sols. Cet effet est amplifié par un réseau dense de haies et accentué en période de sécheresse, la consommation d'eau des arbres et arbustes devenant alors supérieure à celle des cultures voisines (Viaud et al., 2005, 2009). Enfin, Ryszkowski & Kędziora (1993) estiment qu'une haie brise-vent peut évaporer environ 610 mm au cours d'une saison de croissance, contre 500 mm pour une prairie.

SURFACE

Rugosité de surface

La rugosité de surface se définit comme la résistance que la végétation et les microreliefs du sol opposent aux écoulements d'eau. Elle influence directement la vitesse du ruissellement, sa capacité de transport, l'infiltration et la sédimentation (Dautrebande, 2006). Elle constitue donc un paramètre clé pour évaluer l'efficacité des aménagements, notamment des barrières végétales, dans la lutte contre le ruissellement et l'érosion (Richet et al., 2017).

La rugosité est déterminée par plusieurs facteurs :

1. La morphologie de la végétation (largeur de la haie, densité des tiges et des feuilles, etc.) qui conditionne le degré de résistance offert à l'écoulement. Des espèces à forte surface foliaire et à densité élevée créent une rugosité plus importante, favorisant le ralentissement des flux. Le choix des espèces ou la combinaison d'espèces aux traits fonctionnels complémentaires permet ainsi d'optimiser l'efficacité des haies. (Richet et al., 2019)
2. Le microrelief et la structure du sol qui modifient le cheminement de l'eau en surface. La présence de racines et de litière accroît les aspérités et le piégeage de l'eau, tandis qu'une surface lisse ou compactée réduit la rugosité, accélère le ruissellement et limite l'infiltration. Les pratiques de gestion du sol (travail du sol, maintien d'une couverture végétale) jouent donc un rôle essentiel dans la limitation du ruissellement (Dautrebande, 2006).

Cette rugosité intervient à plusieurs niveaux :

1. Dans la dynamique des écoulements, en ralentissant le ruissellement et en augmentant le temps de résidence de l'eau en surface,
2. Dans l'infiltration, en favorisant la percolation vers le sol grâce à ce ralentissement,

3. Dans la limitation de l'érosion, en réduisant l'énergie cinétique et donc la capacité de transport de l'eau (Frankl et al., 2021; Richet et al., 2019; Viaud & Thomas, 2019).

En définitive, la rugosité de surface n'est pas une propriété fixe : elle évolue avec la végétation, la saison et les pratiques de gestion des sols. Dans les paysages agricoles, les haies et autres dispositifs végétatifs jouent un rôle déterminant en augmentant cette rugosité, ralentissant les écoulements et améliorant à la fois l'infiltration et la stabilité des sols (Dautrebande, 2006; Ouvry et al., 2012; Richet et al., 2019; Viaud & Thomas, 2019).



Figure 27 : Exemple d'aménagement paysager (Keyline design) où les haies et bandes végétatives augmentent la rugosité de surface, réduisent le ruissellement et favorisent l'infiltration de l'eau (PermaLab, s. d.).

PARTIE SOUTERRAINE

Fonction de rétention en eau du sol

La fonction de rétention en eau du sol détermine sa capacité à stocker l'eau dans les pores et à la rendre ainsi disponible pour la végétation. La porosité est influencée par la texture (composition en sable, limon, argile et matière organique) et la structure (agencement des particules). La taille des pores conditionne la forme sous laquelle l'eau est stockée (eau gravitaire, capillaire ou hygroscopique) et donc sa disponibilité pour les plantes (Ridremont et al., 2012) (Figure 20).

Cette fonction est représentée par une courbe de rétention qui relie la teneur en eau volumique du sol au potentiel matriciel, c'est-à-dire l'énergie avec laquelle l'eau est retenue dans les pores du sol (Hillel, 1998). Cette courbe est généralement décrite à l'aide de l'équation de Van Genuchten (voir section 3.2.3 point 4).

Le potentiel matriciel peut être exprimé en pression négative (kPa ou bars) ou en pF (défini comme le logarithme décimal de la hauteur de colonne d'eau en centimètres). Plus le potentiel matriciel est faible (proche de 0), plus l'eau est mobile et disponible, alors qu'un potentiel élevé traduit une eau fortement liée aux particules fines et donc indisponible pour les plantes (Hillel, 1998).

Après un épisode pluvieux, l'eau libre contenue dans les macropores s'évacue rapidement jusqu'à atteindre la capacité au champ, où l'eau est principalement retenue dans les mésopores et reste utilisable par les plantes. Lorsque la teneur en eau du sol décroît et atteint le point de flétrissement, l'eau restante est trop liée pour être prélevée. La FAO définit la réserve utile (RU) comme étant la différence entre ces deux seuils, soit l'eau effectivement disponible pour la végétation (Allen et al., 1998).

Graphiquement, la RU correspond à l'aire comprise entre FC et PWP sur la courbe de rétention (Figure 28 : Courbes de rétention en eau pour différents types de sol (sableux, limoneux, argileux). La réserve utile est définie par la zone entre la capacité au champ (FC) et le point de flétrissement (WP) et représente l'eau disponible pour les plantes. (FAO, s. d.)Figure 28).

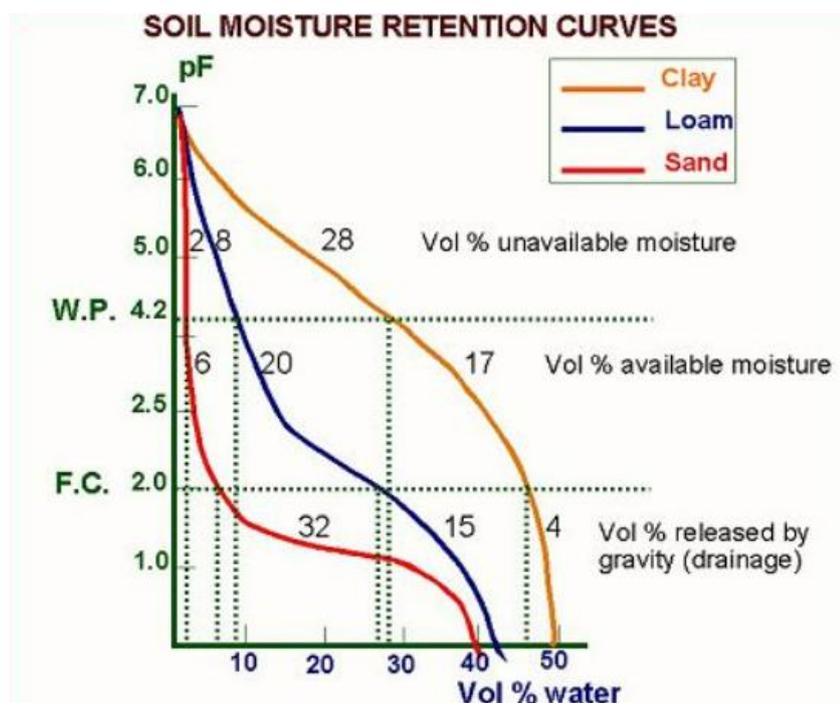


Figure 28 : Courbes de rétention en eau pour différents types de sol (sableux, limoneux, argileux). La réserve utile est définie par la zone entre la capacité au champ (FC) et le point de flétrissement (WP) et représente l'eau disponible pour les plantes. (FAO, s. d.)

Ces trois courbes mettent en évidence la forte dépendance de la RU à l'égard de la texture. En effet, les sols sableux présentent une réserve utile limitée en comparaison aux sols limoneux et argileux qui retiennent davantage d'eau. Toutefois, cette règle doit être nuancée par la teneur en matière organique qui peut influencer la capacité de rétention de certains sols réputés drainants (voir section 2.4.2 point 2)

La présence de haies modifie profondément les propriétés du sol situé sous et à proximité de leurs structures. L'apport continu de matière organique (litière, racines mortes) favorise la formation et la stabilisation des agrégats (Cardinael et al., 2018; Van Den Berge et al., 2021), l'activité racinaire améliore la porosité capillaire (Canadell et al., 1996), la faune du sol (lombrics, champignons mycorhiziens) renforce la structure (Walter et

al., 2003) et la réduction de la compaction abaisse la masse volumique apparente (J. Ma et al., 2024; Ridremont et al., 2012). Ces processus contribuent à une meilleure rétention en eau, expliquant pourquoi un sol sous haie conserve plus d'humidité qu'un sol cultivé (Archer et al., 2013).

En conclusion, la fonction de rétention en eau constitue une caractéristique hydrologique centrale des haies, de par leur influence directe sur la structure, la porosité et la matière organique du sol. Elle conditionne non seulement la réserve utile disponible pour l'évapotranspiration réelle, mais influence également la conductivité hydraulique, qui sera abordée dans la section suivante.

Fonction de conductivité hydraulique du sol

La fonction de conductivité hydraulique exprime la capacité d'un sol à transmettre l'eau à travers son réseau de pores sous l'effet d'un gradient hydraulique¹³. Elle conditionne la vitesse d'infiltration et la circulation de l'eau dans le profil, influençant directement la répartition entre infiltration, ruissellement et écoulements hypodermiques (Calvet, 2013).

La conductivité hydraulique s'exprime en m/s dans le Système international, mais on la retrouve aussi en cm/jour dans de nombreuses études, par convention et pour faciliter la lecture des valeurs.

Cette fonction est représentée par une courbe de conductivité hydraulique décrite par l'équation de Van Genuchten-Mualem (voir 3.2.3 point 5). Celle-ci relie la conductivité hydraulique à la teneur en eau volumique ou au potentiel matriciel. (Figure 29)

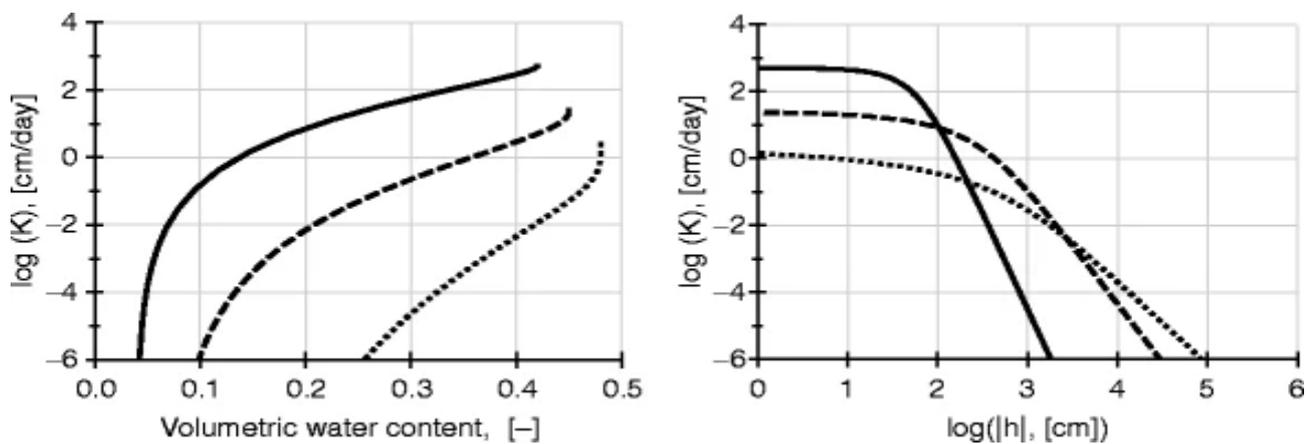


Figure 29 : Courbes de conductivité hydraulique (K) pour des sols grossiers (trait plein), moyens (tirets) et fins (pointillés), en fonction de la teneur en eau à gauche et du potentiel matriciel à droite. Adapté de Van Genuchten (1980).

¹³ L'eau circulant toujours d'un potentiel plus élevé vers un potentiel plus faible.

Le premier graphique à gauche représente la relation $K(\theta)$ qui exprime la conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau du sol. Il met en évidence une conductivité maximale à saturation (K_s) lorsque la teneur en eau est élevée (θ_s), puis une décroissance progressive à mesure que le sol s'assèche.

Le deuxième graphique à droite illustre la relation $K(h)$ qui exprime la conductivité hydraulique en fonction du potentiel matriciel. La conductivité à saturation (K_s) diminue rapidement avec l'augmentation de la succion exercée par le sol, traduisant la vidange progressive des macropores puis des mésopores.

Ces courbes mettent en évidence une conductivité hydraulique qui varie fortement selon la texture : les sols sableux à texture grossière, riches en macropores, présentent des valeurs de K_s très élevées mais une faible capacité de stockage en eau, tandis que les sols argileux, de texture plus fine, possèdent une forte capacité de rétention mais une conductivité beaucoup plus faible en raison de la dominance des micropores (Calvet, 2013; Hillel, 1998).

De plus, une conductivité hydraulique élevée favorise l'infiltration et la percolation en profondeur, réduisant le ruissellement de surface et l'érosion, tout en contribuant à la recharge des nappes. À l'inverse, des sols dégradés par l'intensification agricole (perte de carbone organique, compaction) présentent des valeurs très faibles de K_s , ce qui accroît fortement le risque de ruissellement en cas de pluies intenses (Holden et al., 2019).

De ce fait, les haies constituent des structures particulièrement efficaces pour améliorer cette fonction hydrologique en augmentant la connectivité des pores et l'ouverture de voies préférentielles grâce aux racines grossières, à l'apport de matière organique et à l'activité biologique, tout en limitant la compaction (Cardinael et al., 2018; Ghazavi et al., 2008; Holden et al., 2019; Richet et al., 2017; Ridremont et al., 2012; Walter et al., 2003).

Ces processus expliquent pourquoi la K_s sous haie est systématiquement plus élevée que dans les parcelles voisines cultivées ou pâturées. Archer et al. (2013) rapportent des valeurs 5 à 8 fois supérieures à celles des prairies. Cette forte perméabilité confère aux haies un rôle de zones tampons hydrologiques, capables d'intercepter les flux concentrés et de réduire l'érosion.

En résumé, la conductivité hydraulique constitue, avec la rétention en eau, une propriété hydrologique fondamentale pour caractériser le rôle des haies. La rétention détermine la quantité d'eau stockée, tandis que la conductivité régit la vitesse et les modalités de son transfert. Ces deux fonctions complémentaires expliquent la capacité des haies à limiter le ruissellement et à réguler les écoulements à l'échelle des bassins versants.

Cependant, la disponibilité réelle de cette eau pour la végétation dépend aussi de la manière dont les racines explorent le sol. La profondeur racinaire fixe la limite verticale d'accès à la ressource en eau, tandis que la densité racinaire conditionne l'intensité du prélèvement dans les différentes couches du profil. Ces deux

paramètres jouent donc un rôle central dans la dynamique hydrologique des haies et seront abordés dans les sections suivantes.

Profondeur d'enracinement

La profondeur racinaire représente la profondeur maximale que les racines des plantes peuvent atteindre dans le sol. Contrairement à la vision traditionnelle qui supposait que la majorité de la biomasse racinaire se trouvait dans les 50 premiers centimètres du sol, et qu'une fraction minimale seulement atteignait des profondeurs supérieures, des études ont montré une réalité différente. Les racines profondes sont en effet courantes chez les espèces ligneuses et herbacées à travers la plupart des biomes terrestres, s'étendant bien plus profondément qu'on ne le pensait (Canadell et al., 1996).

La profondeur peut dépendre de la typologie racinaire :

- 1) **Les racines pivotantes** : caractéristiques d'espèces ligneuses comme le chêne ou le noyer qui développent une racine principale qui pénètre profondément dans le sol, souvent sur plusieurs mètres, permettant un accès direct aux réserves profondes et une meilleure résilience en période de sécheresse (Mulia & Dupraz, 2006).
- 2) **Les racines fasciculées** : typiques des graminées ou arbustes (noisetier, troène, sureau, etc.) qui forment un réseau dense et superficiel. Elles exploitent principalement les horizons supérieurs du sol, jouant un rôle majeur dans la cohésion des sols et la réduction de l'érosion, mais limitant l'accès aux couches profondes (Osborn, 2020).

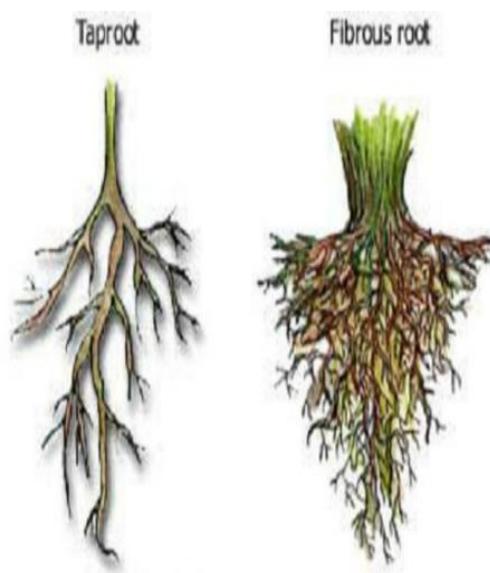


Figure 30 : Illustration de typologies racinaires (Osborn, 2020)

Certaines associations combinent racine pivotante et réseau fasciculé. Cette stratégie permet à la fois de capter l'eau en profondeur tout en tirant profit de l'humidité de surface. Le développement de la profondeur racinaire reste toutefois conditionné par la texture et la structure du sol

En ce qui concernent les espèces ligneuses, la distinction se fait essentiellement par système racinaire :



Figure 31 : Illustration de systèmes racinaires pour des espèces ligneuses (support pédagogique)

Trois grands types de systèmes racinaires sont généralement distingués : premièrement, les systèmes pivotants (ex. chêne, noyer) capables de descendre profondément (Mulia & Dupraz, 2006), ensuite les systèmes traçants (ex. hêtre, frêne, peuplier) qui sont majoritairement superficiels et latéraux et enfin les systèmes mixtes (ex. charme, platane, pin), qui combinent un enracinement profond et latéral (Figure 31).

Le rôle hydrologique de la profondeur racinaire peut se décliner suivant plusieurs points :

1. Absorption de l'eau et résilience à la sécheresse

Les racines profondes jouent un rôle essentiel dans le maintien des flux hydriques, en particulier pendant les périodes de sécheresse. Lorsque les couches superficielles du sol s'assèchent, les plantes se tournent progressivement vers l'eau plus profonde, ce qui leur permet de maintenir la transpiration et de poursuivre leur croissance pendant la saison sèche (Canadell et al., 1996; Ridremont et al., 2012). De plus, le mécanisme de remontée hydraulique permet de redistribuer l'eau prélevée en profondeur vers les couches superficielles, rendant cette humidité accessible aux racines peu profondes (Canadell et al., 1996).

2. Influence sur les propriétés hydrauliques du sol et l'infiltration

Les racines modifient les propriétés hydrauliques du sol, notamment la conductivité hydraulique saturée (K_s) et la teneur en eau à saturation (θ_s), qui conditionnent la répartition des précipitations entre infiltration et ruissellement (Ma et al., 2024). En favorisant la porosité et la macroporosité, notamment dans les sols forestiers, les racines améliorent la rétention d'eau et l'infiltration, expliquant pourquoi ces milieux sont généralement plus filtrants que les prairies (Bansept, 2013; Ridremont et al., 2012). L'infiltration peut ainsi être jusqu'à cinq fois plus élevée que sous les cultures et deux fois plus élevée que sous les prairies. Enfin, en stabilisant la structure du sol, les systèmes racinaires des arbres et des haies réduisent le ruissellement, limitant l'érosion et les risques de crues (Bansept, 2013).

3. L'évapotranspiration

Les arbres sont un élément essentiel du cycle de l'eau, intervenant principalement sur le retour de l'eau à l'atmosphère via l'évapotranspiration, ainsi que sur l'interception des précipitations et le drainage de l'eau dans le sol. Grâce à leurs racines profondes, ils maintiennent un approvisionnement continu en eau, ce qui renforce leur capacité à soutenir des taux d'évapotranspiration élevés même en conditions sèches (Bansept, 2013).

La profondeur détermine ainsi l'accès vertical à la ressource en eau, tandis que la densité racinaire conditionne l'intensité du prélèvement dans les différentes couches du profil. La densité représente donc un autre paramètre clé de la dynamique hydrologique et sera détaillé au point suivant.

Densité racinaire

La densité racinaire représente la quantité de racines présente dans un volume de sol donné. Elle est généralement quantifiée sous deux formes principales :

1. **La densité de longueur racinaire** : correspondant à la longueur totale des racines par unité de volume d'échantillon de sol (m/m^3)
2. **La densité de masse racinaire** : correspondant à la masse sèche des racines par unité de volume d'échantillon de sol (g/m^3) (J. Ma et al., 2024)

L'organisation spatiale du système racinaire d'un arbre adulte peut être divisée en compartiments centraux et périphériques, ainsi qu'en compartiments de surface et de profondeur, tous pourvus de racines fines actives dans le prélèvement d'eau et de minéraux (Ridremont et al., 2012).

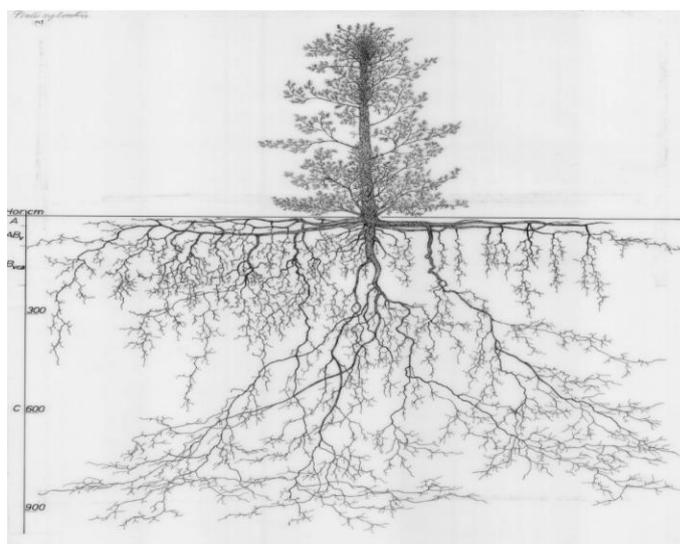


Figure 32 : Exemple d'organisation spatiale du système racinaire d'un arbre adulte (Roth, 2022)

Cette organisation traduit également la plasticité des arbres, c'est-à-dire leur capacité à adapter leurs stratégies d'exploration en fonction des conditions pédologiques et de la compétition avec les cultures. L'expansion spatiale en largeur permet notamment une rétention d'eau dans les premières couches du sol et le maintien d'une humidité de surface (Cardinael et al., 2018). Les racines fines, en particulier, sont essentielles pour l'absorption de l'eau et des nutriments par les plantes et jouent un rôle significatif en tant que puits de carbone dans les communautés végétales (Mulia & Dupraz, 2006).

La densité racinaire est étroitement associée à plusieurs propriétés du sol :

1. **Sa structure et sa porosité** : la pénétration racinaire entraîne l'augmentation de la masse volumique apparente (jusqu'à 30% par rapport au milieu non perturbé) tandis que les radicelles stabilisent les agrégats et favorisent la formation de macropores, améliorant ainsi l'infiltration et la conductivité hydraulique (Calvet, 2013). De plus, les racines contribuent à la formation des agrégats et au maintien de la microporosité, ce qui favorise la rétention d'humidité dans le sol (Cardinael et al., 2018). Une forte densité racinaire est également corrélée à une teneur en eau à saturation plus élevée, renforçant ainsi la capacité de rétention en eau du sol (J. Ma et al., 2024).
2. **La matière organique** : la production de matière organique par les racines et par les micro-organismes contribue à la cohésion des agrégats. L'effet stabilisateur n'est cependant pas permanent en raison de la dégradation progressive de ces composés organiques.
3. **Régime hydrique local** : l'absorption d'eau par les racines modifie l'humidité du sol au voisinage des haies, ce qui entraîne une déshydratation dans leur environnement proche. (Calvet, 2013)

Bien que complexe et variable, la densité racinaire reste un paramètre indispensable pour la modélisation hydrologique. Associée à la profondeur racinaire, elle permet de représenter l'impact des systèmes racinaires sur les propriétés hydrauliques du sol, sur la dynamique de l'eau (infiltration, ruissellement, évapotranspiration) et sur l'efficacité des aménagements végétaux dans la gestion des ressources en eau et la réduction des risques hydrologiques (Ghazavi et al., 2008; J. Ma et al., 2024; Mulia & Dupraz, 2006; Richet et al., 2019).

2.5 OUTILS DE MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

2.5.1 TOUR D'HORIZON DES MODÈLES EXISTANTS

Comme l'énoncent Oreskes et al. (1994), il est humainement impossible d'observer directement et dans leur intégralité les phénomènes naturels. Les modèles hydrologiques constituent donc des outils indispensables pour comprendre, anticiper et simuler des phénomènes complexes. Ils servent aussi bien à la recherche qu'à l'aide à la décision, dans un contexte marqué par le changement climatique et la nécessité d'une gestion durable de l'eau.

Un modèle hydrologique représente une version simplifiée d'un système réel dans un cadre spatial et temporel défini. Il a pour objectif d'analyser les différents processus d'écoulement de l'eau et leurs interactions avec l'environnement afin de prédire le comportement futur du bassin versant. Tout en gardant à l'esprit qu'il ne s'agit que d'une approximation de la réalité, nécessitant toujours une calibration et une validation rigoureuses.

Il existe plusieurs types de modèles, qui se différencient selon leur objectif (prévision, gestion, compréhension) et leur structure (empirique, conceptuel ou physiquement basé) (Ambroise, 2005; Beckers & Degré, 2011):

- 1) **Les modèles empiriques** : Ils sont construits autour d'un ensemble de relations mathématiques ou statistiques entre variables d'entrée (précipitations) et de sortie (débits). Il s'agit d'un système simple qui ne prend pas en compte les principes physiques réels. Ils ne requièrent pas de paramètres physiques détaillés du bassin, mais nécessitent des séries chronologiques pluie-débit suffisantes pour être calibrés. Leur intérêt est essentiellement opérationnel (prévision de crues rapides), mais leur portée scientifique reste limitée.
- 2) **Les modèles conceptuels** : Ils représentent le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant de manière simplifiée sous forme de réservoirs connectés entre eux. Ces réservoirs représentent les différents compartiments hydrologiques du bassin versant. Ce modèle permet, grâce à des fonctions mathématiques simples (souvent basées sur des bilans hydriques), d'établir une relation pluie-débit sans représenter directement les lois physiques en action. Il est adapté à la modélisation à petite échelle et nécessite peu de données caractéristiques du bassin versant étudié.
En revanche, il requiert des séries temporelles longues pour une calibration rigoureuse. Les auteurs (Ambroise, 2005; Beckers & Degré, 2011) insistent sur le fait que les modèles conceptuels, bien que plus réalistes que les empiriques, restent dépendants de la calibration et incapables de reproduire certains processus essentiels comme les écoulements préférentiels.
- 3) **Les modèles physiquement basés et distribués** : Ces modèles visent à représenter le comportement hydrologique d'un bassin versant dans son entièreté. Les différentes phases du cycle de l'eau sont représentées par des équations issues des lois fondamentales de la physique. Elles permettent une modélisation mathématique réaliste des différents processus naturels à l'œuvre dans chaque maille du

bassin versant spatialement représenté. L'objectif est de pouvoir évaluer les processus hydrologiques au niveau local face à différentes occupations du sol. Étant donné le niveau de détail de la représentation spatiale et la complexité des phénomènes naturels concernés, ces modèles nécessitent un grand nombre de jeux de données et des temps de calcul importants. Néanmoins, ils négligent encore certains processus, tels que l'évolution dynamique des sols ou les flux préférentiels, ce qui limite leur capacité à reproduire correctement la genèse des crues et à évaluer l'impact des aménagements paysagers (Beckers & Degré, 2011).

Dans le contexte agricole, plusieurs projets récents ont mobilisé des modèles semi-distribués ou distribués pour évaluer l'efficacité des aménagements paysagers. C'est le cas du projet européen OPTAIN¹⁴ (Figure 33) qui utilise le modèle semi-distribué SWAT+. Ce projet a pour objectif de représenter les processus hydrologiques à l'échelle du bassin versant, en prenant en compte les pratiques culturales à travers des unités de réponse hydrologique. (OPTAIN, 2021)

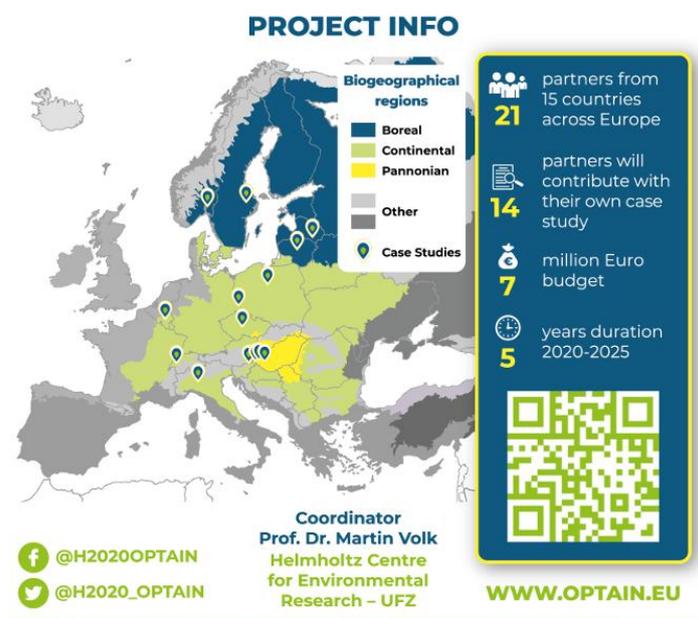


Figure 33 : Présentation du projet européen OPTAIN (OPTAIN, 2021)

Dans ce cadre, le modèle SWAT+ sert à évaluer la performance des mesures d'adaptation fondées sur la nature (NBS), telles que les haies, bandes enherbées ou autres zones tampons, considérées comme des solutions naturelles de rétention d'eau à petite échelle. Ces aménagements sont étudiés dans 14 bassins agricoles situés

¹⁴ OPTAIN : *Optimal Strategies to Retain Water and Nutrients*

en Europe continentale, pannonique¹⁵ et boréale, afin de simuler leur impact local à l'échelle parcellaire ainsi que leur effet cumulé à l'échelle du bassin versant (OPTAIN, 2021).

Ainsi, le choix d'un modèle hydrologique dépend étroitement des objectifs poursuivis, de la disponibilité des données et de l'échelle d'étude. Dans le cadre de ce travail, il s'agit d'analyser les paramètres hydrologiques clés des haies, afin d'affiner leur représentation dans le modèle MIKE SHE. Ce modèle distribué et physiquement basé est reconnu pour sa capacité à intégrer les interactions entre végétation, surface et sous-surface, ainsi que pour sa compatibilité avec une spatialisation détaillée (Refsgaard et al., 2010).

2.5.2 LE MODÈLE : MIKE SHE

Présentation

Le modèle MIKE SHE est un modèle hydrologique européen distribué et physiquement basé, développé dans les années 1980 par un consortium regroupant le Danish Hydraulic Institute (DHI), le British Institute of Hydrology et la SOGREAH (France), dans le but de créer un outil européen de simulation du cycle hydrologique (Refsgaard et al., 2010). Il intègre la quasi-totalité des processus de la phase terrestre du cycle de l'eau, depuis les précipitations jusqu'aux échanges avec la nappe et les rivières. (Ma et al., 2016; Refsgaard et al., 2010)

Le cœur du modèle est structuré en modules interconnectés, chacun représentant un compartiment hydrologique : fonte des neiges, interception, évapotranspiration, écoulements de la zone non saturée, écoulements de surface (ruissellement et chenaux) et écoulements souterrains. Chaque processus est modélisé par une équation physique adaptée, ce qui permet de représenter de manière réaliste la dynamique de l'eau dans ses différents compartiments. (Abbott et al., 1986; Bruyn, 2004)

Utilisation

MIKE SHE est utilisé dans de nombreux contextes de recherche et de gestion des ressources en eau : gestion quantitative et qualitative (nappes, zones humides), évaluation des impacts du changement climatique et des usages du sol, études d'impact environnemental et analyse prospective d'aménagements. Il permet de représenter finement les interactions entre végétation, sol et eau grâce à des paramètres tels que l'indice foliaire (LAI), le coefficient cultural (Kc) ou la profondeur racinaire. Dans le projet MODREC, il est utilisé conjointement avec le modèle GR4H pour simuler la réponse hydrologique de sous-bassins de la Vesdre soumis à différentes occupations du sol. Ces simulations sont ensuite confrontées aux scénarios d'aménagement envisagés dans le Schéma Stratégique Vesdre (Degré et al., 2024). C'est également dans ce

¹⁵ Vaste plaine alluviale d'Europe centrale (Grande Plaine hongroise et bassins voisins), entourée par les Alpes et les Carpates (EEA, 2002)

modèle que sont intégrées les haies étudiées dans ce travail de recherche bibliographique, afin d'affiner leur représentation hydrologique.

Spatialisation et représentation spatiale

MIKE SHE représente spatialement un bassin versant en le divisant en unités de maillage. Chaque maille est caractérisée par ses propriétés pédologiques, sa couverture végétale et sa topographie, et les équations physiques y sont appliquées localement. Ainsi, la réponse hydrologique du bassin versant est calculée pour chaque cellule et non uniquement à l'exutoire. Les processus de surface sont représentés horizontalement par un maillage orthogonal (2D), tandis que les écoulements souterrains sont simulés verticalement par une colonne de couches horizontales (Abbott et al., 1986; Bruyn, 2004; Refsgaard et al., 2010). Cette approche permet de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale et d'évaluer localement l'effet d'aménagements paysagers tels que les haies, fossés ou bandes enherbées.

Limites du modèle

En contrepartie de ce niveau de détail, MIKE SHE requiert un volume important de données d'entrée et des temps de calcul conséquents (Beckers & Degré, 2011; Refsgaard et al., 2010). Certaines limites ont également été soulignées : le modèle n'intègre pas toutes les boucles de rétroaction sol-plante-atmosphère, le bilan hydrique n'est pas totalement fermé, et certains paramètres (comme le LAI) ne sont pas dynamiques. Pour représenter l'évolution temporelle de la végétation, il doit être couplé à des modèles de culture tels qu'AquaCrop (Degré et al., 2024).

De plus, un défi majeur de la modélisation distribuée concerne la représentation de structures linéaires fines comme les haies. Dans un maillage classique de 50×50 m, une haie de quelques mètres de large occupe une surface trop faible pour être représentée directement. Leur influence hydrologique ne peut être représentée directement à cette échelle, ce qui soulève la question de leur paramétrisation. Ce problème est évoqué de manière générale par Beckers & Degré (2011) et Refsgaard et al. (2010), qui soulignent les limites de la résolution spatiale des modèles distribués et leur difficulté à représenter finement certains processus locaux.

Il s'agit d'une limite actuelle de la modélisation qui pose la question de la représentation spatiale de petits objets, tels que les haies, dans des modèles distribués dont la résolution est contrainte par le temps de calcul.

3 MATÉRIELS ET MÉTHODES

3.1 TABLEAU DES DIFFÉRENTES BARRIÈRES VÉGÉTALES À IMPLÉMENTER DANS LE MODÈLE MIKE SHE

	Haies vives	Taillis linéaire	Alignement d'arbres	Miscanthus
	Subventionné			Non subventionné
Autres dénominations	<ul style="list-style-type: none"> - Haies composites - Haies champêtres - Haies bocagères - Haies mixtes - Haies clôtures 	Haies de cépées	<ul style="list-style-type: none"> - Alignement de hauts jets - Alignement de têtards 	Haies herbacées
Composition	<ul style="list-style-type: none"> - Arbres ou arbustes - Espèces locales - Minimum 3 espèces différentes, aucune > 50% des plants - Au moins 2/3 des plants sont des espèces pollinisatrices. 	<ul style="list-style-type: none"> - Arbres ou arbustes destinés à être recépés - Espèces locales - Minimum 3 espèces différentes, aucune > 50% des plants 	Arbres plantés en ligne	Graminées pérennes (ex .Miscanthus x giganteus)
Alignement	<ul style="list-style-type: none"> - Largeur maximale 10m - Un ou plusieurs rangs - Longueur minimale : 100m, en tronçons de 20 m minimum - Espacement entre deux plants : maximum 70 cm - Espacement entre les rangs : entre 70 cm et 1,5 m (Dérogation à 30 cm si coupe un axe de ruissellement) 	<ul style="list-style-type: none"> - Largeur maximale 10m - Un ou plusieurs rangs - Longueur minimale : 100m, en tronçons de 50 m minimum - Espacement entre deux plants : maximum 2 m - Espacement entre les rangs : maximum 3 m 	<ul style="list-style-type: none"> - Un ou deux rangs - Hauteur minimum : 1,20m - Minimum 20 arbres en tronçons de 10 arbres minimum - Espacement entre arbres : 8 à 15m - Densité maximale : 100 arbres /ha 	<ul style="list-style-type: none"> - Rhizomes plantés en ligne - Largeur typique : 1 à 10m - Densité élevée
Objectif	<ul style="list-style-type: none"> - Brise vent - Biodiversité - Frein hydraulique - Production fruits - Complément fourrager - Clôture de parcelle - Production de biomasse 	<ul style="list-style-type: none"> - Clôture de parcelle - Complément fourrager - Production de biomasse - Frein hydraulique 	<ul style="list-style-type: none"> - Brise vent - Biodiversité - Production de biomasse 	<ul style="list-style-type: none"> - Frein hydraulique - Production de biomasse - Biodiversité
Entretien	<ul style="list-style-type: none"> Haies taillées Ou laissées libres 	Recépage à 5 – 10 cm à la base tous les deux ans minimum	Entretien arbres têtards âgés de minimum 30 ans et non taillés depuis au minimum 10 ans	Entretien les 2 premières années
Sources	(Awaf, 2020; YesWePlant, 2024)			(Richet et al., 2019; Valbiom, 2016)

Tableau 4 : Tableau des différentes barrières végétales à implémenter dans le modèle MIKE SHE.

3.2 INDICATEURS CLÉS POUR LE PARAMÉTRAGE

Afin de représenter au mieux la dynamique hydrologique induite par les structures linéaires végétales, il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble des processus d'écoulement et de stockage de l'eau agissant au sein de trois compartiments essentiels : la végétation, la surface et le sol. Chacun de ces compartiments est associé à des paramètres clés qui contrôlent l'infiltration, le ruissellement et l'évapotranspiration. Ces paramètres constituent les données d'entrée indispensables du modèle hydrologique distribué MIKE SHE.

3.2.1 REPRÉSENTATION DE LA VÉGÉTATION

1) LAI

L'indice foliaire (LAI¹⁶) est défini comme la surface totale de feuilles par unité de surface au sol, exprimée en m² de surface foliaire par m² de surface au sol (Allen et al., 1998; Bréda, 2003). C'est une mesure directe de la densité de végétation. Ainsi, un LAI de 3 signifie qu'il y a 3 m² de feuilles pour chaque m² de surface au sol (Pocock et al., 2010).

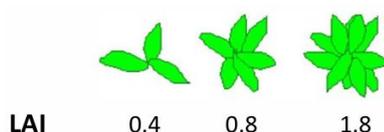


Figure 34 : Exemple de variation du LAI en fonction du développement foliaire au cours de la saison

Le LAI contrôle plusieurs processus hydrologiques essentiels :

1. **L'interception des précipitations** : une canopée dense capte une part importante de la pluie avant qu'elle n'atteigne le sol, réduisant ainsi le ruissellement direct.
2. **L'évapotranspiration** : le LAI détermine par son développement, la surface foliaire disponible pour les échanges gazeux avec l'atmosphère et la transpiration (Allen et al., 1998).
3. **la dynamique saisonnière** : le LAI varie au cours de la saison et se caractérise par trois phases de développement : une phase ascendante (croissance), une phase de maintien (maturité) et une phase descendante lors de la sénescence des feuilles (Bréda & Granier, 1996).

La FAO donne des valeurs typiques de LAI comprises entre 3 et 5 pour de nombreuses cultures matures (Allen et al., 1998). Ces valeurs sont cependant influencées par le climat et les propriétés du sol, en particulier la disponibilité en eau du sol (Bréda & Granier, 1996).

¹⁶ LAI : Leaf Area Index

Implémentation dans MIKE SHE : le LAI est défini par classes de végétation et fractionné temporellement en fonction des stades de développement du végétal. Les haies sont paramétrées comme des peuplements forestiers à petite échelle, avec une évolution saisonnière du LAI lié à leur caractère caduc.

2) **K_c**

Le coefficient cultural (**K_c**) est un indice étroitement lié à l'évapotranspiration des cultures. Selon la FAO, il est défini comme le rapport entre l'évapotranspiration réelle d'une culture (**ET_c**) et l'évapotranspiration de référence (**ET₀**), cette dernière étant calculée pour une prairie standard de graminées courtes, saine et sans contrainte hydrique. (Allen et al., 1998)

$$ET_c = K_c \cdot ET_0$$

Le **K_c** traduit ainsi l'effet du couvert végétal sur l'évapotranspiration. Sa valeur dépend à la fois du type de végétation, de son stade de développement et des conditions hydriques :

1. **K_c = 1** correspond à la culture de référence dans des conditions optimales,
2. **K_c < 1** indique une évapotranspiration inférieure à la référence (végétation clairsemée, début de croissance, stress hydrique, ...)
3. **K_c > 1** reflète une évapotranspiration supérieure à la référence (cultures denses ou arbres en pleine croissance) (Guyot, 2013)

Le **K_c** est étroitement lié au développement foliaire, et donc au LAI, mais de manière indirecte. En effet, si le **K_c** dépend de la surface foliaire disponible pour les échanges gazeux, il intègre également d'autres facteurs comme le type de végétation, le stade de développement végétal et les conditions environnementales.

La variation annuelle du coefficient cultural est généralement décrite en quatre phases : initiale, développement, pleine saison et sénescence. Ces phases diffèrent selon le type de végétation : annuelle, pérenne ou persistante (Allen et al., 1998) (Figure 35).

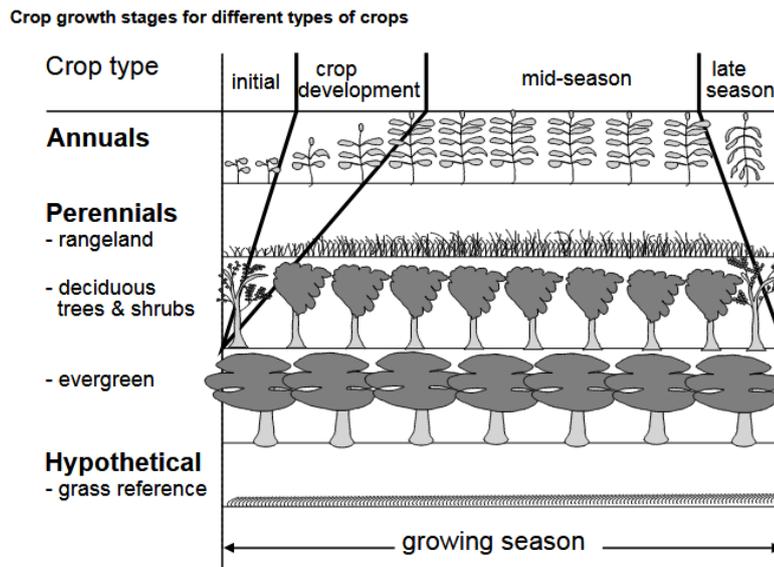


Figure 35 : Stades de développement de différentes cultures pendant la saison de croissance FAO (Allen et al., 1998).

En début de saison, les pâturages ainsi que les arbres et arbustes à feuilles caduques présentent un K_c faible, correspondant au stade de sortie de dormance et de débournement. Ils évoluent ensuite rapidement vers une forte croissance en milieu de saison, avant de terminer par un K_c très bas lié au flétrissement et à la chute des feuilles. À l'inverse, les arbres à feuilles persistantes conservent un K_c relativement stable tout au long de l'année tandis que la prairie de graminées de référence définit l'évapotranspiration de référence (ET_0).

Intégrer le coefficient cultural dans un modèle hydrologique comme MIKE SHE permet de représenter l'occupation du sol liée aux haies et de simuler leur influence sur les flux hydriques. Plus précisément, ce paramètre rend possible l'estimation de la consommation en eau de la végétation ligneuse et herbacée des haies, et contribue ainsi à caractériser les flux de percolation profonde que les haies modifient au sein du paysage agricole (Allen et al., 1998; Viaud et al., 2005).

Implémentation dans MIKE SHE : le K_c est défini par type de végétation et fractionné annuellement selon les phases de croissance, de la même manière que le LAI. Ce dernier contribue à ajuster le K_c et leur combinaison permet d'éviter de sous-estimer ou de surestimer l'évapotranspiration des haies.

3.2.2 REPRÉSENTATION DE LA SURFACE

1) Coefficient de Manning (n)

Le coefficient de Manning (n) est un paramètre empirique fondamental en hydrologie. Il caractérise la rugosité hydraulique d'une surface, c'est-à-dire la résistance que celle-ci oppose à l'écoulement, et permet d'estimer la vitesse des flux d'eau. Il est ainsi essentiel pour comprendre et modéliser la manière dont l'eau interagit avec les paysages, en particulier dans les bassins versants agricoles où les haies jouent un rôle de frein hydraulique (Ouvry et al., 2012; Richet et al., 2017, 2019).

Le coefficient de Manning est calculé à partir de la formule de Manning — Strickler dont l'expression est la suivante :

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

Avec

V : la vitesse moyenne d'écoulement au droit de l'obstacle (m/s) définie comme le débit moyen divisé par la section mouillée,

n : le coefficient de Manning ($s/m^{1/3}$)

R_h : le rayon hydraulique de l'écoulement (m), correspondant au rapport entre la section de l'écoulement et le périmètre mouillé,

S : la pente (m/m) (Frankl, De Boever, et al., 2021; Richet et al., 2017).

Dans la pratique, la section est généralement mesurée au plus près de l'obstacle végétal, tandis que la pente est calculée à partir du lit en amont (Richet et al., 2017). Son estimation repose donc sur la pente, le débit et la hauteur d'eau, et peut parfois inclure l'observation d'un ressaut hydraulique en amont, utilisé comme indicateur de l'interaction entre l'écoulement et la végétation (Ouvry et al., 2012).

Plusieurs éléments peuvent influencer la valeur du coefficient de Manning :

1. **Végétation** : la densité de tiges, la hauteur et le type de couvert (haies arbustives, bandes herbacées, fascines) influencent directement la rugosité de surface.
2. **Microrelief et litière** : les talus associés aux haies, la litière ou le paillage accroissent la résistance hydraulique, notamment lors de faibles débits, en augmentant la hauteur d'eau et la section hydraulique mouillée.

3. **Interaction avec l'écoulement** : bien que théoriquement constant, le coefficient de Manning peut varier. À faibles hauteurs d'eau, la rugosité est accentuée, tandis qu'à plus forts débits, la végétation peut être submergée ou se déformer, réduisant ainsi la résistance hydraulique.
4. **Variabilité saisonnière** : l'évolution de la végétation au cours de l'année (débourrement, croissance, sénescence) et l'accumulation de dépôts de surface peuvent modifier la rugosité observée (Ouvry et al., 2012; Richet et al., 2017, 2019).

Le coefficient de Manning (n) est donc un indicateur permettant de représenter, dans les modèles hydrologiques, l'impact des haies sur la dynamique du ruissellement.

Implémentation dans MIKE SHE : le n est défini en fonction du type de couverture du sol et des structures végétales présentes. Pour les haies, il traduit leur rôle de frein hydraulique en augmentant la rugosité de surface et en ralentissant l'écoulement. Sa valeur doit être ajustée en fonction de la densité et de la structure des haies (n plus élevé si haies denses et matures, n plus faible pour des haies jeunes ou clairsemées), afin de simuler correctement leur influence sur le ruissellement, l'infiltration et le transfert d'eau vers l'aval.

3.2.3 REPRÉSENTATION DE LA PARTIE SOUTERRAINE

1) **Fonction de densité racinaire**

Dans MIKE SHE, la densité racinaire sert à décrire la répartition verticale des racines dans le profil de sol. Elle permet de paramétrer la zone racinaire des haies et de répartir le prélèvement d'eau en fonction de la profondeur. Ce paramètre contrôle ainsi directement le calcul de l'évapotranspiration réelle et de la disponibilité en eau dans le sol. Dans ce travail, la fonction de densité racinaire est définie à partir des valeurs issues de la littérature et est intégrée au modèle afin de caractériser la zone d'extraction hydrique.

2) **Profondeur racinaire**

La profondeur racinaire maximale correspond à la limite verticale d'exploration des racines. Elle définit la profondeur totale de la zone racinaire, tandis que la densité décrit la manière dont le prélèvement d'eau est réparti à l'intérieur de cette zone. Ces deux paramètres sont donc complémentaires.

Dans MIKE SHE, la profondeur racinaire est exprimée en millimètres et conditionne la quantité d'eau mobilisable en profondeur par la végétation. Sa valeur est paramétrée sur la base des données bibliographiques disponibles pour les haies et utilisée conjointement avec la densité racinaire afin de simuler correctement l'évapotranspiration réelle, la disponibilité en eau et la réponse hydrologique des haies à l'échelle du bassin versant.

3) MO

La teneur en matière organique est un paramètre essentiel car elle influence directement la porosité et la capacité de rétention en eau du sol. En augmentant la teneur en eau à saturation, elle agit comme un « réservoir » qui améliore l'infiltration et le stockage de l'eau dans le profil de sol (Bansept, 2013) (Voir section 2.4.2).

Implémentation dans MIKE SHE : la matière organique n'est pas intégrée comme une variable indépendante mais bien comme une variable d'ajustement de la courbe de rétention en eau du sol en étant intégrée sous forme de pourcentage.

4) Courbe de rétention en eau du sol

La courbe de rétention en eau exprime la relation entre le potentiel matriciel et la teneur en eau volumique du sol (Van Genuchten, 1980).

Elle est généralement caractérisée par la fonction de Van Genuchten (1980) définie par cinq paramètres fondamentaux :

1. θ_s : teneur en eau à saturation (cm^3/cm^3)

C'est le paramètre le plus important à prendre en compte car il correspond à la porosité totale du sol et détermine la quantité maximale d'eau stockée lorsque tous les pores sont saturés. Il est directement influencé par la texture, la structure, la masse volumique apparente et la teneur en matière organique.

2. θ_r : teneur en eau résiduelle (cm^3/cm^3)

Ce paramètre indique la quantité d'eau qui reste dans le sol lorsque l'eau libre n'est plus disponible et qu'elle n'est plus retenue que par adsorption dans les micropores. Il ne devrait pas évoluer de manière significative suite à la plantation des haies.

3. α : point d'entrée d'air.

4. n et m : indices de distribution des pores.

On déduit souvent m à partir de n par la formule $m = 1 - 1/n$ (Calvet, 2013)

La teneur en eau à saturation (θ_s) représente la quantité maximale d'eau que le sol peut contenir dans ses pores lorsqu'il est totalement saturé. Ce paramètre est équivalent à la porosité totale c'est-à-dire au volume total des vides du sol saturé en eau.

La relation entre la porosité totale et la masse volumique du sol peut être exprimée par la formule suivante (Calvet, 2013):

$$\theta_s = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}$$

1. θ_s : porosité totale
2. ρ_a : masse volumique apparente du sol en g/cm^3
3. ρ_s : $2,65 \text{ g/cm}^3$ (constante : masse volumique moyenne pour la matière minérale)¹⁷

Plus la masse volumique apparente est élevée, plus la porosité diminue et donc plus la teneur en eau à saturation est faible. Les principaux facteurs influençant θ_s sont la texture du sol (sables, limons et argiles présentent des porosités différentes), la structure (agrégats et macropores), la matière organique (qui accroît la porosité dans les sols riches en MO) et la compaction (qui la réduit) (Calvet, 2013).

Pour illustrer la courbe de rétention en eau selon le modèle de Van Genuchten (1980), deux situations ont été comparées sur les 40 premiers centimètres d'un sol limoneux peu caillouteux à drainage favorable. La première correspond à un sol initial sans haie avec un paramétrage de base (courbe bleue) et la seconde à un sol sous haie « ModRec » de 3 mètres de large (courbe orange) (Figure 36).

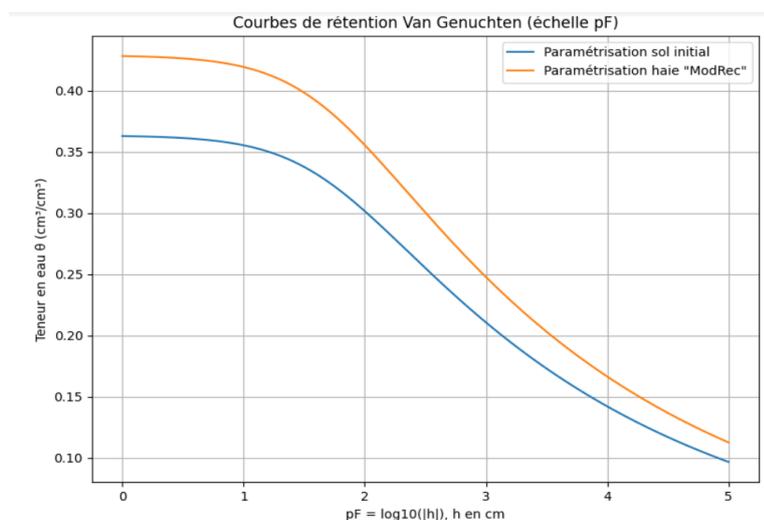


Figure 36 : Illustration de l'effet de θ_s sur la courbe de rétention en eau du sol

Le graphique comparatif met en évidence un décalage de la courbe orange vers le haut, traduisant une augmentation de la teneur en eau volumique liée à la présence de la haie (Figure 36).

¹⁷ Il est important de noter que l'utilisation de la densité réelle ($2,65 \text{ g/cm}^3$) suppose que le sol est essentiellement minéral. Or, cette valeur peut être plus faible si l'on prend en compte la fraction de MO dont la densité est inférieure à celle de la fraction minérale.

Cette différence indique une capacité accrue de stockage en eau, induite par une augmentation de la porosité sous haie pour un même potentiel matriciel. Elle reflète également une teneur en eau à saturation (θ_s) plus élevée qui se traduit par une augmentation de la réserve utile. Cet effet provient de l'enrichissement en matière organique, de l'activité biologique et de la moindre compaction, qui contribuent à accroître la proportion de mésopores, améliorant ainsi la disponibilité en eau pour la végétation (Cardinael et al., 2018; Hillel, 1998; J. Ma et al., 2024; Van Den Berge et al., 2021; Walter et al., 2003).

Implémentation dans MIKE SHE :

Seul le paramètre de teneur en eau à saturation (θ_s) est ajusté afin de représenter l'effet de la macroporosité induite par les haies. Lorsque des données de masse volumique apparente sont disponibles, θ_s peut être estimé à partir de la relation entre la porosité totale et la densité apparente.

Cette démarche permet de refléter au plus près les implications réelles en termes d'infiltration et de teneur en eau du sol en fonction des variations climatiques, tout en assurant une cohérence entre les observations pédologiques et le paramétrage du modèle.

5) Courbe de conductivité hydraulique

La courbe de conductivité hydraulique exprime la relation entre le potentiel matriciel du sol et la conductivité hydraulique. Elle permet ainsi d'évaluer concrètement l'aptitude du sol à transmettre l'eau au sein du profil (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980).

Elle est généralement décrite par la fonction de Van Genuchten-Mualem, qui repose sur quatre paramètres :

1. **K_s** : la conductivité hydraulique à saturation (m/s). C'est le paramètre le plus important car il détermine la capacité maximale du sol à transmettre l'eau lorsqu'il est entièrement saturé.

Les autres paramètres sont des constantes empiriques communes à la courbe de rétention :

2. **α** : point d'entrée d'air
3. **n et m** : indices de distribution des pores
4. **I** : shape factor : coefficient de forme (Mualem, 1976).

Tous les paramètres nécessaires à l'application des équations de Van Genuchten et Mualem peuvent être obtenus grâce aux fonctions de pédotransfert comme celles proposées par Szabó et al. (2021). Celles-ci utilisent comme variables d'entrée des paramètres physiques du sol tels que la texture du sol, la masse volumique apparente et la teneur en matière organique (Szabó et al., 2021).

Pour illustrer la courbe de conductivité hydraulique selon le modèle de Van Genuchten - Mualem, les deux mêmes situations que pour l'illustration de la courbe de rétention ont été reprises sur les 40 premiers centimètres d'un sol limoneux peu caillouteux à drainage favorable. La première correspond à un sol initial avec un paramétrage de base (courbe bleue) et la seconde à un sol sous haie « ModRec » de 3 mètres de large (courbe orange).

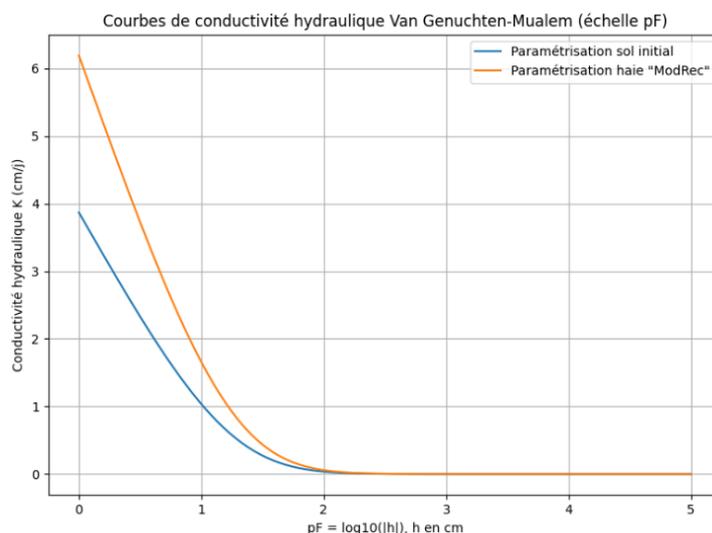


Figure 37 : Illustration de l'effet de Ks sur la courbe de conductivité hydraulique

Le graphique comparatif (Figure 37) met en évidence l'effet des haies sur la conductivité hydraulique. La courbe orange associée au sol sous la haie se situe au-dessus de la courbe bleue (sol initial dépourvu de haie), ce qui traduit une capacité du sol plus élevée à conduire l'eau pour un même potentiel matriciel. Cet écart indique une conductivité hydraulique (K_s) à saturation plus importante qui témoigne d'une meilleure circulation de l'eau dans le profil de sol.

Cette augmentation résulte des modifications de la structure du sol induites par la présence de la haie telles que le développement racinaire, les apports de matière organique, l'activité biologique et l'absence de compaction mécanique. Ces processus enrichissent le sol en macropores stables et améliorent la connectivité des pores, facilitant l'infiltration et l'écoulement vertical, comme l'ont montré plusieurs études sur des haies bocagères et en contexte agroforestier (Cardinael et al., 2018; Ghazavi et al., 2008; Holden et al., 2019; Richet et al., 2017; Walter et al., 2003).

Implémentation dans MIKE SHE :

Afin de représenter l'influence des haies, seul K_s est ajusté pour refléter l'augmentation de la macroporosité observée en conditions saturées. Lorsque des données de terrain sont disponibles, la conductivité hydraulique peut être estimée au moyen des fonctions de transfert intégrant la texture, la masse volumique apparente et la

teneur en matière organique. De cette façon, cela permet de traduire de manière cohérente l'amélioration de l'infiltration sous haie dans les conditions réelles du bassin versant et de mieux représenter le partage entre infiltration, ruissellement et recharge de la nappe.

3.2.4 CONSTRUCTION DU TABLEAU CROISÉ

Après avoir présenté les principaux paramètres hydrologiques nécessaires à une modélisation distribuée (LAI, K_c , coefficient de Manning, densité et profondeur racinaire, teneur en matière organique, courbes de rétention et de conductivité), l'étape suivante consiste à rassembler, dans un tableau croisé, les valeurs issues de la littérature afin de permettre leur comparaison. Ce tableau mettra en relation les types de haies subventionnées en Région wallonne et les paramètres hydrologiques mesurés sur le terrain.

Dans ce cadre, les données de masse volumique apparente seront converties en teneur en eau à saturation (θ_s) à partir de la formule reliant la masse volumique apparente à la porosité totale (Calvet, 2013) (Voir section 3.2.3 point 4). Les valeurs de conductivité hydraulique à saturation (K_s), quant à elles, seront également intégrées au tableau croisé comme paramètres distincts.

Pour comparer les études menées dans des contextes pédologiques différents, des deltas ($\Delta\theta_s$, ΔK_s) seront calculés, en prenant comme références différents types de couvert (cultures, pâtures, bandes enherbées).

Cette approche a pour objectif de dépasser l'hétérogénéité des études de cas et de mettre en évidence l'effet spécifique des haies sur les propriétés hydrologiques des sols, afin de fournir une base solide pour l'affinage de scénarios comparatifs « avec » et « sans » haies dans le modèle MIKE SHE.

Dans la section suivante, les études seront regroupées par paramètre clé et présentées sous forme de blocs successifs. Les valeurs jugées pertinentes seront ensuite reportées dans un tableau en fonction du type de haie concerné, afin de faciliter la comparaison. Ces résultats feront ensuite l'objet d'une analyse approfondie dans la section consacrée à la discussion des résultats.

4 RÉSULTATS

Les recherches bibliographiques se sont essentiellement concentrées sur le recensement des études de terrain menées sur le continent européen, principalement dans des régions à climat tempéré. Nous avons choisi de travailler avec des haies matures, car l'objectif n'était pas de représenter leur phase d'installation, mais bien de rendre compte de situations en place depuis plusieurs années.

Ce choix permet de visualiser dans un modèle hydrologique les effets réels d'une haie arrivée à maturité, afin que la modélisation ait du sens et reflète au maximum son impact sur les différents processus hydrologiques à l'échelle du bassin versant.

Les études recensées portant sur les paramètres clés nécessaires à une modélisation hydrologique sont présentées ci-après.

4.1 PARAMÈTRES CLÉS

4.1.1 L'INDICE FOLIAIRE (LAI)

À défaut de données spécifiques sur les arbres isolés ou les alignements d'arbres, les valeurs de LAI issues des forêts ont été retenues comme référence comparative. Il convient toutefois de garder à l'esprit que, dans un contexte forestier, le développement aérien et racinaire des arbres est limité par la compétition pour les ressources et diffère donc de celui des haies.

Dans le cadre d'une étude menée sur une période de cinq ans en forêt de Champenoux dans le Grand Est de la France, **Bréda & Granier (1996)** ont mesuré le débourrement, l'indice foliaire (LAI) et la transpiration d'un peuplement de chênes sessiles (*Quercus petraea*) âgé de 35 ans. Leurs résultats ont mis en évidence un LAI maximal compris entre 3,3 et 6,0 selon les années. Les mesures ont révélé un développement foliaire très rapide au printemps : huit jours après le débourrement, 80% du LAI maximal était atteint et la transpiration représentait 50% de l'évapotranspiration potentielle (ETP). Ces résultats ont permis de démontrer une corrélation linéaire entre le LAI et la transpiration du peuplement de chênes sessiles durant le printemps, tant que l'humidité du sol n'était pas limitante. Par la suite, le LAI a continué à augmenter au fil de la saison via les pousses secondaires alors que la transpiration a progressivement diminué, impactée par la sécheresse édaphique en particulier lorsque la fraction d'eau disponible pour les plantes dans le sol est descendue en dessous de 0,4. (Bréda & Granier, 1996)

Pocock et al. (2010) ont travaillé sur une exploitation agricole gérée en agriculture biologique de 125 hectares dans le Somerset, au sud-ouest du Royaume-Uni, durant les étés 2007 et 2008 avec pour objectif d'une part l'estimation du LAI pour chaque espèce végétale à l'échelle d'une exploitation agricole entière et d'autre part

le développement de modèles prédictifs afin de pouvoir estimer l'effet de différents scénarios de gestion agricole sur le développement foliaire.

Les mesures, effectuées sur 23 parcelles composées de cultures annuelles et de prairies, ont porté sur cinq types de végétation : la végétation non ligneuse (incluant les cultures et végétations non gérées), les haies, les arbres isolés sur pied, la canopée forestière et le sous-étage forestier (végétation ligneuse située entre le sous-bois et la canopée). Cette campagne de mesures a permis d'estimer le LAI moyen sur une période allant du mois de juin au mois d'août pour les années 2007 et 2008.

Les résultats obtenus sont : céréales (3,3), prairies (4,1), haies matures incluant la végétation basale (6,4), haies matures excluant la végétation basale (6,8), nouvelles haies incluant la végétation basale (5,3), nouvelles haies excluant la végétation basale (5,9), végétation herbacée semi-naturelle et luzerne (5,8), forêt totale (8,0, dont canopée : 3,9 ; sous-étage : 1,4 ; sous-bois : 2,7) et arbres isolés (3,9). (Tableau 5)

La moyenne pondérée pour l'ensemble de la ferme est de 4,1, soit environ 5 063 960 m² de surface foliaire totale.

Habitat	LAI (average across months)
Cereal fields	3.3
Grass fields	4.1
Mature hedgerows (including basal vegetation)	6.4
Mature hedgerows, excluding basal vegetation	6.8 ^a
New hedgerows (including basal vegetation)	5.3
New hedgerows, excluding basal vegetation	5.9 ^a
Semi-natural herbaceous vegetation and lucerne crop	5.8
Total woodland	8.0
Woodland canopy	3.9
Woodland sub-storey	1.4
Woodland understorey	2.7
Isolated standing trees	3.9
Total (weighted by land area)	4.1

^a The decrease in LAI of the hedgerow when including the basal vegetation is because the increase in total leaf area when including the basal vegetation did not compensate for the increase in area of ground sampled (see Section 2).

Tableau 5 : Indice foliaire moyen estimé pour les 5 types de végétation étudiés. Résultats obtenus dans la zone d'étude du Somerset (Royaume-Uni) pour les mois de juin, juillet et août en 2007 et 2008 (Pocock et al., 2010).

Les modèles prédictifs élaborés par Pocock et al. (2010), basés sur leurs mesures de terrain, ont montré que pour la végétation non ligneuse, la variation du LAI dépendait du type de végétation et de sa hauteur alors que pour les haies, le LAI dépendait de la hauteur et de la largeur de celles-ci.

Dans le cadre de cette recherche, seront retenues les valeurs de LAI moyen estimées pour les arbres isolés (3,9) et pour les haies matures mesurées sans la végétation basale (6,8). En effet, cette couche herbacée au pied des haies biaise les résultats en augmentant la surface au sol de référence plus rapidement que l'augmentation de la surface foliaire totale de la haie.

4.1.2 COEFFICIENT DE MANNING

Richet et al. (2017) ont calculé en Haute-Normandie dans le nord-ouest de la France, à l'aide d'un simulateur de ruissellement, le ralentissement dynamique de l'eau créé par des haies arbustives à plat et des fascines.

L'objectif de cette étude était de quantifier leur résistance hydraulique, leur capacité de sédimentation et leur capacité d'infiltration en mesurant le flux d'eau arrivant et ressortant de la haie. Le dispositif de test a permis de tester des débits spécifiques de 0,5 à 12 L/s/m sur des haies implantées sur un sol de type limon moyen-sableux

Les résultats obtenus par le biais du coefficient de Manning (n) pour des haies très denses avec plus de 50 tiges/mètre linéaire, ont donné des valeurs de n entre 0,4 à 0,8 $s/m^{1/3}$. Alors que pour une haie de 7 ans ayant moins de 20 tiges/mètre linéaire, les valeurs de n mesurées vont de 0,06 à 0,08 $s/m^{1/3}$ seulement.

Les auteurs concluent que la densité des tiges sortant du sol constitue un facteur déterminant pour un ralentissement hydraulique efficace. Grâce à un nombre de racines plus important et une couche de litière plus épaisse, les haies anciennes présentent une meilleure résistance hydraulique que les haies plus jeunes et sont donc plus efficaces en tant que barrières végétales pour réduire le ruissellement érosif (Ouvry et al., 2012; Richet et al., 2017).

Richet et al. (2019) ont conduit en Normandie, dans le cadre du projet AREAS, une expérimentation sur des haies herbacées implantées en canaux expérimentaux (miscanthus, fétuque élevée, carex). L'objectif de cette étude était de quantifier leur résistance hydraulique ainsi que leur capacité de sédimentation, en utilisant un dispositif de simulation de ruissellement permettant d'appliquer des débits spécifiques allant de 0,5 à 12 L/s/m sur un sol limon moyen-sableux.

Les résultats obtenus, à partir du coefficient de Manning, montrent que les trois espèces testées présentent des valeurs élevées et comparables à celles de haies arbustives denses menées lors de l'étude (Richet et al., 2017) quelques années auparavant. En moyenne, le miscanthus affiche un n de 0,63 $s/m^{1/3}$, la fétuque 0,56 $s/m^{1/3}$ et le carex 0,57 $s/m^{1/3}$.

Selon les données présentées par les auteurs, dans un tableau comparatif, les haies herbacées, et en particulier le miscanthus, atteignent leur efficacité nominale en seulement 12 à 36 mois, soit beaucoup plus rapidement que des haies arbustives qui nécessitent souvent 7 à 15 ans pour acquérir une densité suffisante. De plus, leur efficacité est comparable à celle des fascines vivantes, tout en offrant une durabilité plus longue (plus de 20 ans). Ces résultats mettent en avant les haies herbacées comme une solution végétative rapide et efficace pour la réduction du ruissellement et de l'érosion dans les paysages agricoles (Richet et al., 2019).

En Belgique, les résultats du projet de recherche « Intell'eau » mené en 2021 et 2024, ont récemment été publiés par **Boutarfa et al. (2025)**. Cette étude, menée sur plusieurs sites expérimentaux en Wallonie, avait pour objectif d'évaluer l'efficacité hydraulique de bandes de miscanthus (*Miscanthus giganteus*) implantées entre 2012 et 2018.

Ces bandes de miscanthus, d'une densité de 20 000 rhizomes/ha, sont situées en bas de parcelle, perpendiculairement aux pentes variant de 4 % et 12% et couvrant des largeurs de 3 à 6 m. Elles ont été comparées à des bandes enherbées, avec des débits d'entrée contrôlés allant de 0,5 à 4 L/s.

La résistance hydraulique a été évaluée à travers le coefficient de Manning (n) et a donné comme résultat, pour l'ensemble des sites étudiés, des valeurs comprises entre 0,37 et 0,80 s/m^{1/3} selon la pente, la densité et l'âge de la plantation. Une forte corrélation positive a été mise en évidence entre la densité des tiges et le coefficient de Manning.

L'étude a également permis de mesurer un taux moyen d'infiltration, dont les résultats seront présentés dans la partie consacrée à la conductivité hydraulique.

Les résultats du coefficient de Manning montrent que les bandes de miscanthus exercent un frein hydraulique significatif, particulièrement marqué pour les parcelles à forte densité de tiges et situées en pente forte, tout en contribuant à l'infiltration de l'eau de surface.

4.1.3 DENSITÉ RACINAIRE

Dans le sud de la France, **Cardinael et al. (2018)** ont étudié un système agroforestier associant des rangées de noyers âgés de 18 ans et des cultures annuelles de blé dur. Leur objectif était d'analyser la distribution des racines et les interactions entre arbres et sol sur la dynamique du carbone. Pour cela, ils ont combiné des mesures de terrain réalisées sur un sol brun limono-argileux avec des modélisations numériques. Ils ont pu mettre en évidence une forte concentration de la densité racinaire fine (< 2 mm) dans les 50 premiers centimètres du sol, avec une valeur maximale de 350 g/m² au pied des arbres. Cette densité, testée sur des échantillons de sol d'une profondeur de 2 mètres, diminuait fortement à mesure que la profondeur et la distance augmentaient (6 m). Cette étude a démontré une corrélation positive entre la densité racinaire fine et les stocks de carbone organique du sol, surtout dans la couche 0-60 cm, confirmant ainsi le rôle central des racines dans l'enrichissement organique du sol. (Cardinael et al., 2018)

Mulia & Dupraz (2006) ont étudié les racines fines chez deux espèces d'arbres à feuilles caduques (le noyer et le peuplier) sur un sol alluvial argilo-limoneux dans le sud de la France. Ils ont comparé des systèmes agroforestiers à des systèmes forestiers purs sur une superficie couvrant 12,5 ha. Des indicateurs d50 (profondeur à laquelle se trouvent 50% des racines) et d90 (profondeur à laquelle se trouvent 90% des racines) qualifient la distribution verticale.

Leurs résultats montrent que le peuplier privilégie l'enracinement vertical, avec un d50 atteignant 1,21 m et un d90 de 2,03 m en agroforesterie, contre un d50 de 0,86m et d90 de 1,94m en forêt pure. Le noyer développe ses racines dans les zones proches du tronc en surface, avec un d50 de 0,27m et un d90 de 0,87 m en forêt pure et sa densité racinaire décroît ensuite avec la distance horizontale au tronc (Cardinael et al., 2018 ; Mulia & Dupraz, 2006).

Ces deux espèces font preuve d'une plasticité racinaire importante selon la compétition exercée par les cultures : le noyer développe par exemple ses racines en dehors de la zone racinaire des cultures, atteignant un d50 de 1,41m et un d90 de 2,48m en agroforesterie, tandis que le peuplier est moins affecté par cette compétition. Ce dernier évite les premières dizaines de centimètres du sol sous les cultures et colonise plus facilement les couches profondes avec une densité racinaire pouvant atteindre 3,8 cm/cm³ à 1,8m de profondeur. (Mulia & Dupraz, 2006)

L'étude de **Ghazavi et al. (2008)**, menée en Bretagne dans le nord-ouest de la France, visait à évaluer l'impact des haies bocagères sur la répartition des pluies, les recharges et fluctuations de la nappe, la distribution racinaire et les variations de potentiel hydrique du sol.

La zone d'étude correspondait à un versant de pente faible à modérée (3–5 %), occupé par une haie bocagère (chênes) implantée sur talus et perpendiculaire à la pente. Deux transects ¹⁸ espacés de 10 m et disposés perpendiculairement à la haie, ont été suivis sur 16 m en amont et 12 m en aval. L'analyse a porté sur une tranchée pédologique de 28 m de long et 2 m de profondeur, creusée dans un sol de type sablo-limoneux.

Les résultats ont montré une distribution racinaire majoritairement concentrée du côté amont (76 % contre 23 % en aval).

En amont : les racines se déploient jusqu'à 8 m de profondeur. La majorité se concentre entre 10 - 50 cm (63%), puis entre 50 et 100 cm (35%), tandis que seulement 2 % dépassent 1 m. Au-delà des 8 m de la haie, la

¹⁸ Lignes d'échantillonnage

répartition change : 55% des racines se trouvent entre 10 - 50 cm, 40% entre 50 - 100 cm et 5% au-delà de 1 m.

En aval : la concentration des racines dans les 8 premiers mètres est encore plus marquée dans les couches superficielles : 91 % se situent entre 10 et 50 cm, 8 % entre 50 et 100 cm et 1 % entre 100 et 150 cm. Plus loin, entre 8 et 10 m, 99 % des racines restent confinées dans les 50 premiers centimètres.

Dans leur étude, Ghazavi et al. (2008) mettent en évidence une asymétrie marquée de la distribution racinaire entre l'amont et l'aval de la haie. En amont, l'enracinement est plus profond et plus important, permettant ainsi un prélèvement d'eau en grande profondeur tandis qu'en aval, l'enracinement est limité aux horizons superficiels en raison des conditions plus compactes et hydromorphes du sol ainsi qu'à la proximité de la nappe. Les auteurs concluent que la répartition racinaire est influencée par la topographie et les propriétés du sol, conditionnant ainsi les échanges hydriques autour de la haie.

Archer et al., (2013), dans le cadre de leurs recherches sur la conductivité hydraulique dans un bassin versant situé à Eddleston, en Écosse, ont comparé, sur une zone de 0,5 km², quatre types de forêts à des prairies intensément pâturées, sur des sols et topographies similaires. Les résultats des mesures de terrain réalisées entre 0,04 à 0,15 m de profondeur montrent que la conductivité hydraulique saturée (Ks) médiane est nettement plus élevée sous trois forêts de feuillus que dans les prairies voisines : 174 mm/h dans une forêt ancienne de 500 ans, 119 mm/h dans une forêt mixte de 180 ans, toutes deux situées en haut de versant sur des sols sableux grossiers bien drainés et 8 mm/h dans une forêt de saules (*Salix caprea*) de 180 ans implantée en plaine alluviale sur des sols limono-argileux. (Tableau 12)

Selon l'analyse statistique, cette augmentation est attribuée à la présence de racines de plus de 2 mm de diamètre, favorisant les flux préférentiels ainsi qu'à une couche organique plus épaisse dans les sols forestiers. Le reste de l'étude sera détaillé dans la partie traitant de la conductivité hydraulique, seuls les résultats concernant les racines sont présentés ici.

En ce qui concerne la densité racinaire, Archer et al. (2013) ont montré que les forêts feuillues anciennes comptaient en moyenne 6 à 7 racines de plus de 2 mm. Les forêts mixtes de 180 ans présentaient des valeurs proches de 6, tandis que les peuplements de pins sylvestres de 45 ans en comptaient environ 4. Enfin, les forêts de saules en plaine alluviale affichaient la densité la plus faible, avec près de 3 racines. Ces résultats confirment que la densité de racines épaisses joue un rôle majeur dans l'amélioration de la conductivité hydraulique des sols, avec des variations marquées selon le type de peuplement. (Archer et al., 2013)

4.1.4 PROFONDEUR RACINAIRE

Viaud et al. (2005) ont réalisé une revue bibliographique sur la profondeur maximale d'enracinement pour différents types de végétation (Tableau 6). Ils compilent notamment des études émanant de plusieurs sources différentes. Leurs résultats indiquent des profondeurs maximales d'enracinement variables selon le type de végétation (arbres, arbustes et plantes herbacées) telles que décrites dans l'étude de Canadell et al. (1996) présentée ci-après. Le tableau 6 fait état de cas plus spécifiques : un chêne sessile de 32 ans implanté sur sol profond dans le nord-est de la France présente une profondeur d'enracinement supérieure à 1,4 m, tandis que des chênes centenaires étudiés en Bretagne atteignent environ 2 m (Viaud et al., 2005).

V. Viaud et al. / *Agricultural Water Management* 74 (2005) 135–163

145

Table 2
Literature review of tree rooting depth

Vegetation	Conditions	Maximum rooting depth	Source
Trees	Several climate conditions	–7.0 to –1.2 m	Canadell et al. (1996)
Shrubs		–5.1 to –0.8 m	
Herbaceous plants		–2.6 to –0.1 m	Bréda et al. (1993)
A 32-year-old sessile oak (<i>Q. petraea</i> Liebl.)	Stand in deep soils in North-Eastern France	Over –1.4 m	
100-year-old oaks (<i>Quercus robur</i> and <i>Q. petraea</i>)	Brittany, Western France	Around –2 m	Raimbault (1990)

Tableau 6 : Revue de littérature sur la profondeur maximale d'enracinement de différents végétaux (Viaud et al., 2005)

Canadell et al. (1996) cités par Viaud et al. (2005) ont répertorié 290 observations sur la profondeur maximale d'enracinement dans la littérature, couvrant 253 espèces ligneuses et herbacées appartenant aux principaux biomes terrestres. Ces observations ont été réparties en trois groupes fonctionnels : arbres, arbustes et plantes herbacées avec comme résultat une profondeur maximale d'enracinement de $7,0 \pm 1,2$ m pour les arbres, de $5,1 \pm 0,8$ m pour les arbustes et de $2,6 \pm 0,1$ m pour les plantes herbacées (Tableau 6).

En ce qui concerne plus particulièrement les milieux tempérés qui nous intéressent dans ce travail, les profondeurs d'enracinement répertoriées dans leur synthèse sont de : $3,9 \pm 0,4$ m pour les forêts de conifères, $2,9 \pm 0,2$ m pour les forêts de feuillus et $2,6 \pm 0,2$ m pour les prairies (Canadell et al., 1996).

4.1.5 MASSE VOLUMIQUE APPARENTE

Les recherches in situ menées par Walter et al. (2003) sur sept sites de Bretagne (nord-ouest de la France) ont porté sur des haies bocagères implantées sur des talus parallèles aux courbes de niveau. Les sites étudiés reposaient majoritairement sur des sols de texture limoneuse. Les résultats ont montré une masse volumique apparente plus faible sous les haies ($1,20 \text{ g/cm}^3$) que dans les zones éloignées à plus de 40 m ($1,41 \text{ g/cm}^3$) (Tableau 7). Cette différence est attribuée à l'activité biologique sous la haie (racines, litière) ainsi qu'à l'absence de tassement mécanique aux abords des haies. Ils notent également une augmentation progressive de cette masse volumique apparente avec la profondeur, passant de $1,18 \text{ g/cm}^3$ dans l'horizon de surface à $1,40 \text{ g/cm}^3$ à plus de 70 cm de profondeur (Walter et al., 2003).

Factor	<i>n</i>	Bulk density (g cm ⁻³) ^a	SOC content (g kg ⁻¹) ^a
General	461	1.34 (0.008)	14.6 (0.68)
Substrate			
Granite	70	1.14 ^A (0.021)	22.0 ^A (1.75)
Schist	391	1.37 ^B (0.008)	13.1 ^B (0.71)
Distance to hedge			
0–2 m	103	1.20 ^A (0.020)	16.7 ^A (1.31)
5–10 m	130	1.39 ^B (0.014)	11.6 ^B (0.83)
20–30 m	113	1.42 ^B (0.013)	11.4 ^B (0.69)
>40 m	55	1.41 ^B (0.012)	10.4 ^B (0.95)
Soil depth			
0–10 cm	65	1.18 ^A (0.021)	32.3 ^A (3.41)
20–30 cm	128	1.31 ^B (0.014)	17.9 ^B (0.74)
30–60 cm	145	1.37 ^C (0.015)	9.7 ^C (0.58)
>70 cm	123	1.40 ^C (0.015)	7.6 ^D (0.41)
Horizon type			
Ap & A	339	1.33 ^A (0.010)	14.5 ^A (0.63)
Apg & Ag	62	1.35 ^A (0.023)	16.9 ^A (1.92)
B & C	60	1.32 ^A (0.023)	6.9 ^B (3.23)

^aNumbers are means with standard errors in parentheses; means with same superscript letters are not significantly different (*t*-tests, *P*=0.05).

Tableau 7 : Valeurs de masse volumique apparente et de stock de carbone en fonction du type de substrat, de la distance par rapport à la haie, de la profondeur du sol et du type d'horizon. Résultats obtenus pour des haies sur 7 sites en Bretagne (Walter et al., 2003)

Suivant la formule qui relie la masse volumique apparente à la porosité totale (Calvet, 2013), les données relevées par Walter et al. (2003) peuvent être utilisées pour calculer les valeurs de θ_s (porosité totale assimilée à la teneur en eau à saturation) :

Avec la formule :
$$\theta_s = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}$$

- θ_s : porosité totale
- ρ_a : masse volumique apparente du sol (g/cm³)
- ρ_s : 2,65 g/cm³ (constante : masse volumique moyenne de la phase minérale) (Calvet, 2013)

Factor	<i>n</i>	Bulk density (g cm ⁻³) ^a	Résultats	
			Porosité θ_s	$\Delta\theta_s$
Distance to hedge				
0–2 m	103	1.20 ^A (0.020)	0,547	0,079 (+8%)
5–10 m	130	1.39 ^B (0.014)	0,475	0,008 (+0,8%)
20–30 m	113	1.42 ^B (0.013)	0,464	-0,004 (-0,4%)
>40 m	55	1.41 ^B (0.012)	0,468	0,00
Soil depth				
0–10 cm	65	1.18 ^A (0.021)	0,555	0,083 (+8%)
20–30 cm	128	1.31 ^B (0.014)	0,506	0,034 (+3%)
30–60 cm	145	1.37 ^C (0.015)	0,483	0,011 (+1%)
>70 cm	123	1.40 ^C (0.015)		

Tableau 8 : Tableau de Walter et al. (2003) modifié avec les valeurs de teneur en eau à saturation associées aux mesures de masse volumique apparente réalisées sur le terrain.

Pour le calcul du $\Delta\theta_s$, les références retenues correspondent aux valeurs maximales de profondeur (> 70m) et de distance par rapport à la haie (> 40m), conformément aux données de la littérature qui indiquent une augmentation de la masse volumique apparente avec l'éloignement de la haie et la profondeur.

Au cours de leurs recherches au nord de la Belgique, dans la région de Turnhout, **Van Den Berge et al. (2021)** ont mis en évidence l'influence des haies et des "haies fantômes" (arrachées depuis 1960) sur les stocks de carbone organique du sol (SOC) et sur la masse volumique apparente. Cette étude s'est portée sur une superficie de 5600 ha de terres agricoles, les sols étudiés présentaient des textures sableuses à sablo-limoneuses. Trois types de couvert végétal ont été étudiés à savoir 10 parcelles bordées de haies vivantes, 10 parcelles bordées de haies fantômes et 6 parcelles par des bandes enherbées. Les haies vivantes étaient anciennes (environ 58 ans) et présentaient une structure multi-strates (herbacée, arbustive, arborée) composée essentiellement de bouleau verruqueux, de chêne pédonculé, de cerisier tardif et de saule marsault.

Les résultats dans les 23 premiers cm du sol montrent une masse volumique apparente plus faible sous haies (1,127 g/cm³) que sous haies fantômes (1,369 g/cm³) et bandes enherbées (1,297 g/cm³). Les haies présentent également une teneur en carbone organique du sol 44% plus élevée que les bandes enherbées, stock qui disparaît presque totalement après arrachage.

Les valeurs de masse volumique apparente obtenues peuvent être converties en porosité totale (θ_s).

$$(\theta_s = 1 - \rho_a/\rho_s)$$

$$\Delta\theta_s = \theta_s (\text{haie}) - \theta_s (\text{référence})$$

Masse volumique apparente (ρ_a)	Porosité totale (θ_s)	$\Delta \theta_s$
Haies : 1,127 g/cm ³	0,575	
Haies fantômes : 1,369 g/cm ³	0,483	0,091 (+9%)
Bandes enherbées : 1,297 g/cm ³	0,511	0,064 (+6%)

Tableau 9 : Porosité totale et deltas calculés pour 3 types de couvert dans la région de Turnhout, en Belgique (Van Den Berge et al., 2021).

Les valeurs de référence choisies pour le calcul du $\Delta \theta_s$ sont les haies fantômes et les bandes enherbées.

Les résultats montrent une porosité des sols sous la haie supérieure de 9% à celle des haies fantômes et de 6% pour les bandes enherbées.

En conclusion, la faible ρ_a sous haie traduit une plus forte θ_s et une accumulation de matière organique, ce qui explique les stocks élevés de carbone du sol. À l'inverse, l'augmentation de ρ_a observée après arrachage des haies entraîne une baisse de la porosité et une perte majeure de SOC, confirmant le rôle structurant des haies et leur impact sur la fertilité des sols. (Van Den Berge et al., 2021)

L'étude comparative menée par **Holden et al. (2019)** sur une zone de 12km² dans un bassin versant du nord du Pays de Galles (ouest du Royaume-Uni) avait comme objectif l'évaluation du rôle des haies par rapport à d'autres types de couverture végétale (bandes enherbées, champs cultivés et pâturés) dans la régulation hydrologique et la qualité des sols. Les haies étudiées étaient des haies plessées¹⁹ traditionnelles, âgées de 30 ans et implantées sur talus. Le sol est de composition limoneuse bien drainée.

Les résultats de cette étude ont mis en évidence des différences marquées entre les types de couvertures étudiées. La masse volumique apparente moyenne dans les 0–50 cm est plus faible sous les haies (1,259 g/cm³) que sous les pâtures (1,422 g/cm³), les bandes enherbées (1,489 g/cm³) ou les cultures (1,540 g/cm³). De même, la compaction de surface moyenne, correspondant à la résistance à la pénétration mesurée à l'aide d'un pénétromètre à cône, présente des valeurs nettement plus faibles sous les haies (40 N/cm²), contre 61 N/cm² pour les pâtures et les bandes enherbées, et 67 N/cm² pour les cultures. Ces données s'expliquent par l'absence de passages d'engins agricoles ou de piétinement par les animaux ainsi que par un apport plus important en matière organique, rendant les sols sous haies moins compactés avec une masse volumique apparente plus faible que celles des couverts végétaux voisins.

De plus, les mesures d'humidité du sol à 5, 20 et 50 cm de profondeur montrent que les sols sous haies, tant en été (avril-septembre) qu'en hiver (octobre-mars), sont plus secs que ceux des autres types de couvert.

Grâce à la formule permettant de relier la masse volumique apparente à la porosité totale (Voir section 3.2.3 point 4), nous pouvons obtenir les valeurs de θ_s suivantes utiles dans le cadre de notre recherche (Tableau 810).

Les références choisies pour le calcul du $\Delta \theta_s$ sont les champs pâturés, les bandes enherbées et les cultures

¹⁹ Haies vives taillées et tressées afin de créer une clôture végétale (*Le plessage des haies*, s. d.).

$$(\theta_s = 1 - \rho_a / \rho_s)$$

$$\Delta\theta_s = \theta_s (\text{haie}) - \theta_s (\text{référence})$$

Masse volumique apparente (ρ_a)	Porosité totale (θ_s)	$\Delta \theta_s$
Haies : 1,259 g/cm ³	0,525	
Pâtures : 1,422 g/cm ³	0,463	0,062 (+6%)
Bandes enherbées : 1,489 g/cm ³	0,438	0,087 (+8%)
Cultures : 1,540 g/cm ³	0,419	0,106 (+10%)

Tableau 10 : Porosité totale et deltas calculés pour les 4 types de couvert de référence sur le bassin versant du nord du Pays de Galles, au Royaume-Uni. (Holden et al., 2019)

Les résultats montrent une porosité des sols sous la haie supérieure de 6% à celle des pâtures, de 8% à celle des bandes enherbées et de 10% à celle des cultures.

Sur la courbe de rétention en eau, cela se traduit par une élévation de θ_s . La courbe sera décalée vers le haut, indiquant une teneur en eau à saturation plus élevée que sous les autres couverts.

4.1.6 CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE À SATURATION (Ks)

Dans leur étude sur l'effet des haies arbustives à plat et des fascines sur le ralentissement de l'eau en Haute-Normandie, **Richet et al. (2017)** ont mesuré, au pied des haies et en conditions saturées pendant les essais, pour des débits spécifiques compris entre 0 à 4,1 L/s/m, des capacités d'infiltration comprises entre 110 et 580 mm/h, avec une moyenne de 400 mm/h (entre 300 et 500 mm/h) pour des haies à plat très denses (plus de 50 tiges / mètre linéaire) sur un sol de type limon moyen-sableux.

Les auteurs précisent que le dispositif des haies, au vu de son effet significatif sur l'infiltration par rapport aux fascines (moyenne de 170 mm/h), présente un intérêt supplémentaire en situation perpendiculaire au versant pour intercepter des ruissellements diffus et réinfiltrer une partie des écoulements (Ouvry et al., 2012 ; Richet et al., 2017).

Ces mesures de terrain peuvent être assimilées à une estimation de la conductivité hydraulique saturée (Ks), en conditions saturées et à débit constant. En notant toutefois qu'il s'agit d'une estimation et que des différences peuvent provenir de la macroporosité créée par les racines, la faune et la structure du sol, mais

également des méthodes de mesure et des conditions de surface (croûte de battance, couverture végétale, ...) (Allen et al., 1998; Calvet, 2013)

Pour notre recherche, les données récoltées lors des travaux de Richet et al., (2017) sont comparées aux valeurs de référence de la FAO²⁰ qui donnent une perméabilité moyenne pour des sols limoneux de 2,5 cm/h. Cette valeur (25 mm/h) doit être interprétée comme un repère dans une gamme de valeurs allant de 10 à 25 mm/h et non comme une constante pour tous les sols limoneux.

$$K_s \text{ (m/s)} = \frac{\text{mm/h}}{3,6 \times 10^6} \quad \frac{\Delta K_s = (K_s \text{ (haie)} - K_s \text{ (référence)}) \times 100}{K_s \text{ (référence)}} \quad \frac{K_s \text{ (haie)}}{K_s \text{ (référence)}}$$

Capacité d'infiltration (mm/h) Haies à plat denses	Ks (m/s)	ΔKs %	Facteur
Moyenne : 400 mm/h	1,11 x 10 ⁻⁴		
Référence (FAO) Sol sablo-limoneux : 25 mm/h	6,94 x 10 ⁻⁶	+ 1500	x 16

Tableau 11 : Conductivité hydraulique saturée mesurée pour des haies à plat en Normandie (Richet et al., 2017) et calcul du delta par rapport au sol de référence de la FAO.

Les résultats indiquent que la conductivité hydraulique saturée moyenne est supérieure de 1500% par rapport à la valeur de référence FAO pour des sols sablo - limoneux, ce qui correspond à une valeur environ 16 fois plus élevée.

Dans le cadre de leurs recherches sur la conductivité hydraulique dans un bassin versant situé à Eddleston, en Écosse, Archer et al. (2013) ont comparé, sur une zone de 0,5 km², quatre types de forêts à des prairies intensément pâturées, sur des sols et topographies similaires. Les résultats des mesures de terrain réalisées entre 0,04 à 0,15 m de profondeur montrent que la conductivité hydraulique saturée (Ks) médiane est nettement plus élevée sous trois forêts de feuillus que dans les prairies voisines : 174 mm/h dans une forêt ancienne de 500 ans, 119 mm/h dans une forêt mixte de 180 ans, toutes deux situées en haut de versant sur des sols sableux grossiers bien drainés et 8 mm/h dans une forêt de saules (*Salix caprea*) de 180 ans implantée en plaine alluviale sur des sols limono-argileux. (Tableau 12)

Selon l'analyse statistique, cette augmentation est attribuée à la présence de racines de plus de 2 mm de diamètre qui favorisent les flux préférentiels et à une couche organique plus épaisse dans les sols forestiers. À

²⁰ LE SOL : https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706f/x6706f09.htm

l'inverse, la quatrième forêt composée de pins sylvestres (*P.sylvestris*) âgés de 45 ans et située en milieu de pente sur des sols sableux-graveleux, n'a montré qu'une légère augmentation (42 mm/h) par rapport au pâturage voisin (35 mm/h) (Tableau 12).

La plaine alluviale, riche en limons et argiles fines, présente une conductivité hydraulique à saturation (K_s) nettement plus faible (1mm/h) que celle des versants plus sableux et graveleux, où les valeurs varient entre 21 et 39 mm/h. Archer et al. (2013) concluent que, dans les prairies dépourvues de racines épaisses, c'est la structure du sol en surface qui constitue le principal facteur explicatif des variations de K_s .

$$\frac{\Delta K_s = K_s (\text{forêt}) - K_s (\text{prairies adj}) \times 100}{K_s (\text{prairies adj})} \quad \frac{K_s (\text{forêt})}{K_s (\text{prairies adj})}$$

Type de forêt	Position	K_s forêts (mm/h)	K_s prairie adjacente (mm/h)	ΔK_s %	Racines >2mm moyenne	Facteur
Forêt feuillue 500 ans	Haut de pente	174	39	+ 346	6,6	x 4
Forêt mixte 180 ans	Haut de pente	119	21	+ 467	6,0	x 6
Pins sylvestres 45 ans	Milieu de pente	42	35	+ 20	4,2	x 1
Forêt saules 180 ans	Bas de pente (Plaine humide)	8	1	+ 700	3,8	x 8

Tableau 12 : Conductivité hydraulique saturée mesurée et nombre moyen de racines (> 2 mm) par trou de mesure (jusqu'à 0,15 m de profondeur) pour 4 types de forêts du bassin versant de l'Eddleston, en Écosse (Archer et al., 2013).

Ces résultats révèlent une corrélation positive entre le nombre de racines > 2mm et les valeurs de K_s , ce qui soutient l'idée que ces racines génèrent des macropores favorisant les écoulements préférentiels. Archer et al. (2013) montrent également, via des épisodes de pluie modélisés (15 minutes, période de retour de 10 ans), que les forêts feuillues et mixtes favorisent largement l'infiltration, tandis que certaines prairies et la plaine alluviale génèrent probablement un écoulement de surface. La plantation de forêts feuillues sous forme de bosquets, de haies ou sur versant pourrait ainsi améliorer l'infiltration des précipitations et réduire le ruissellement lors des épisodes de crues.

L'étude comparative menée par Holden et al. (2019) réalisée sur la ferme de l'Université de Leeds dans le North Yorkshire (Nord de l'Angleterre) sur un bassin versant d'environ 12 km², avait pour objectif l'évaluation du rôle des haies par rapport à d'autres types d'occupation du sol (bandes enherbées, champs cultivés et pâturés) dans la régulation hydrologique et la qualité des sols. Les haies étudiées étaient des haies plessées traditionnelles, âgées de 30 ans et implantées sur talus, sur un sol limoneux bien drainé.

Les analyses de carottes de sol (2,5 et 17,5 cm de profondeur) en laboratoire ont mis en évidence des différences marquées entre les types de couvert. La masse volumique apparente moyenne dans les 0–50 cm est plus faible sous haies (1,259 g/cm³) que sous pâtures (1,422 g/cm³), bandes enherbées (1,489 g/cm³) ou cultures (1,540 g/cm³). Tout comme la compaction de surface moyenne, qui atteint seulement 40 N/cm² sous haies contre 61 N/cm² pour les pâtures et les bandes enherbées, et 67 N/cm² pour les cultures. Ces données s’expliquent par l’absence de passages d’engins agricoles et de piétinement animal ainsi que par un apport plus important en matière organique.

De plus, les mesures d’humidité du sol à 5, 20 et 50 cm de profondeur montrent que les sols sous haies, tant en été (avril-septembre) qu’en hiver (octobre-mars), sont plus secs que ceux des autres types de couvert.

La conductivité hydraulique saturée médiane (Ks) est nettement plus élevée sous haies (102 mm/h) que sous les pâtures et bandes enherbées (20–30 mm/h) ou sous cultures (3 mm/h). De plus, les profils d’humidité atteignent leur maximum environ 1 h plus tard sous haies que dans les champs ou les bandes enherbées adjacents.

Ces résultats montrent que les terres cultivées sont plus exposées aux risques d’inondations en raison de leur faible Ks qui entraîne des ruissellements de surface suite à la saturation rapide des sols. À l’inverse, les sols des haies, grâce à leur Ks plus élevé, possèdent une plus grande capacité d’infiltration et peuvent intercepter une partie des écoulements de surface provenant des champs voisins.

Les capacités d’infiltration ont été converties en Ks, ΔKs et facteurs multiplicatifs afin de permettre leur comparaison et leur intégration dans le modèle MIKE SHE

$$K_s \text{ (m/s)} = \frac{\text{mm/h}}{3,6 \times 10^6} \quad \frac{\Delta K_s = K_s \text{ (haie)} - K_s \text{ (type couvert)} * 100}{K_s \text{ (type couvert)}} \quad \frac{K_s \text{ (haie)}}{K_s \text{ (couverts)}}$$

Capacité d’infiltration (mm/h)	Ks (m/s)	ΔKs	Facteur
Haies : 102 mm/h	2,83 x 10 ⁻⁵		
Pâtures : 20-30 mm/h	Entre 5,56 x 10 ⁻⁶ et 8,33 x 10 ⁻⁶	Entre 240 % et 410 %	x 5 x 3
Bandes enherbées : 20-30 mm/h	Entre 5,56 x 10 ⁻⁶ et 8,33 x 10 ⁻⁶	Entre 240 % et 410 %	x 5 x 3
Cultures : 3 mm/h	8,33 x 10 ⁻⁷	+3300 %	x 34

Tableau 13 : Conductivité hydraulique saturée et deltas calculés pour 4 types de couvert du bassin versant du nord du Pays de Galles, au Royaume-Uni (Holden et al., 2019).

Les résultats montrent que la valeur de conductivité hydraulique saturée (K_s) est nettement supérieure sous haies, avec une valeur environ 3 à 5 fois plus élevée que sous pâtures ou bandes enherbées et près de 34 fois plus élevée que sous cultures.

En Belgique, les résultats du projet de recherche « Intell'eau » mené entre 2021 et 2024, ont récemment été publiés par **Boutarfa et al. (2025)**. Cette étude, menée sur plusieurs sites expérimentaux en Wallonie, avait pour objectif d'évaluer l'efficacité hydraulique de bandes de miscanthus (*Miscanthus giganteus*) implantées entre 2012 et 2018.

Ces bandes de miscanthus, d'une densité de 20 000 rhizomes/ha, sont situées en bas de parcelle, perpendiculairement aux pentes variant de 4 % et 12% et couvrant des largeurs de 3 à 6 m. Elles ont été comparées à des bandes enherbées, avec des débits d'entrée contrôlés allant de 0,5 à 4 L/s.

En parallèle des résultats concernant le coefficient de Manning, cette étude a permis de mesurer pour la première fois un taux moyen d'infiltration de 83 mm/h dans les bandes de miscanthus, confirmant leur capacité à absorber une partie des flux de ruissellement. Ce taux reste toutefois inférieur à celui observé pour d'autres dispositifs végétatifs tels que les taillis (saules) à courte rotation (coupe tous les 3 à 5 ans) également étudiés dans cette étude.

Les données récoltées lors des travaux de Boutarfa et al. (2025) sont comparées aux valeurs de référence de la FAO²¹ qui donnent une infiltration moyenne pour des sols limoneux de 13 mm/h. Cette valeur n'est pas à considérer comme une constante pour tous les sols limoneux.

$$K_s \text{ (m/s)} = \frac{\text{mm/h}}{3,6 \times 10^6} \quad \frac{\Delta K_s = (K_s \text{ (miscanthus)} - K_s \text{ (référence)}) \times 100}{K_s \text{ (référence)}} \quad \frac{K_s \text{ (miscanthus)}}{K_s \text{ (référence)}}$$

Capacité d'infiltration (mm/h) Bandes de miscanthus	K_s (m/s)	ΔK_s %	Facteur
Miscanthus : 83 mm/h	$2,31 \times 10^{-5}$		
Référence (FAO) Sol limoneux : 13 mm/h	$3,61 \times 10^{-6}$	+ 538	x 6

Tableau 14 : Conductivité hydraulique saturée mesurée pour des bandes de miscanthus en Belgique (Boutarfa et al., 2025) et calcul du delta par rapport au sol de référence de la FAO.

²¹ LE SOL : https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706f/x6706f09.htm

Les résultats indiquent que la conductivité hydraulique saturée moyenne des bandes de miscanthus est supérieure de 538 % à la valeur de référence de la FAO pour des sols limoneux dépourvus de haies, ce qui correspond à une valeur environ 6 fois plus élevée (Figure 14). Par ces résultats, les bandes de miscanthus confirment leur capacité à absorber une partie des flux de ruissellement en favorisant l'infiltration des eaux.

L'étude de [Wallace et al. \(2021\)](#) menée dans le bassin versant de la rivière Leith au nord-ouest du Royaume-Uni avait pour objectif d'évaluer de façon quantitative la façon dont les haies et leurs bandes enherbées modifiaient les propriétés hydrauliques du sol de surface et la génération de ruissellement de surface, en comparaison avec des prairies pâturées voisines.

L'expérience étalée sur une durée de 11 mois (10 avril 2019 – 10 mars 2020), reposait sur deux parcelles jumelées (8,75 m² par parcelle, soit 17,5 m × 0,5 m), comparant des pâtures améliorées (ray-grass, pâturées par ovins et bovins) à des haies plantées en 2003 (50 % aubépines, 40 % pruneliers, 10 % rosiers et noisetiers), bordées d'une bande enherbée non pâturée de 6 m de largeur. Les quatre profils de sols sous les parcelles d'observation du ruissellement présentaient des textures de sol similaires (limoneuses à argilo-limoneuses) ainsi que des pentes uniformes au sein de chaque zone d'étude.

Les résultats de cette étude détaillés dans les tableaux 15 et 16 montrent que les bandes enherbées jouxtant les haies (HWM) améliorent nettement les propriétés physiques du sol par rapport aux pâtures (AIP).

Les valeurs de masse volumique apparente passent de 0,90 g/cm³ (AIP) à 0,66 g/cm³ sous HWM, présentant ainsi une baisse de 27 %. La porosité, partant de 58,5 % en pâtures, augmente jusqu'à 59,9 % sous HWM et la teneur en matière organique présente un gain de 43 % sous bandes enherbées adjacentes aux haies par rapport aux AIP, passant de 10,9 % à 15,6 % (Tableau 15).

	Site	ρ_b (g/cm ⁻³)	η (%)	OM (%)
P1	Pasture plot 1	9.3×10^{-1} (2.5×10^{-2})	58.0 (0.2)	10.4 (0.7)
P2	Pasture plot 2	8.8×10^{-1} (5.8×10^{-2})	59.1 (0.2)	11.5 (1.6)
AIP	Agriculturally Improved-Pasture	9.0×10^{-1} (5.1×10^{-2})	58.5 (0.6)	10.9 (1.3)
M1	Wild-margin plot 1	5.6×10^{-1} (1.1×10^{-1})	59.2 (0.2)	16.5 (5.6)
M2	Wild-margin plot 2	7.6×10^{-1} (3.8×10^{-2})	60.7 (0.4)	14.8 (7.0)
HWM	Hedgerow Wild-Margin	6.6×10^{-1} (1.3×10^{-1})	59.9 (0.8)	15.6 (6.2)

Tableau 15 : Valeurs moyennes arithmétiques et écarts-types (entre parenthèses) de la densité apparente sèche du sol (ρ_b), de la porosité (η) et de la teneur en matière organique (OM) pour les parcelles de pâtures P1 et P2 et les bandes enherbées M1 et M2 adjacentes aux haies.

Sont également présentées les valeurs combinées pour les AIP et les HWM. Valeurs obtenues pour un nombre total de 32 échantillons dans le bassin versant de la rivière Leith au nord-ouest du Royaume-Uni. (Wallace et al., 2021)

En ce qui concerne la perméabilité, la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) se montre bien supérieure dans les HWM (M1 et M2), atteignant des valeurs médianes de 7290 - 8780 mm/h contre seulement 317 – 324 mm/h en pâtures (P1 et P2), soit une augmentation de 2200 – 2700 % (Tableau 16).

Parameter	P1	M1 ^a	P2	M2 ^a
K_{sat} geometric mean (mm/hr)	3.43×10^2	7.65×10^3	2.82×10^2	7.64×10^3
K_{sat} arithmetic mean (mm/hr)	4.09×10^2	8.72×10^3	3.18×10^2	8.46×10^3
K_{sat} median (mm/hr)	3.17×10^2	8.78×10^3	3.24×10^2	7.29×10^3
K_{sat} minimum (mm/hr)	1.68×10^2	3.27×10^3	1.19×10^2	4.02×10^3
K_{sat} maximum (mm/hr)	8.92×10^2	1.78×10^4	4.75×10^2	1.35×10^4

Tableau 16 : Valeurs de K_{sat} moyenne, médiane, minimum et maximum pour les pâtures P1 et P2 et les bandes enherbées M1 et M2 adjacentes aux haies. Valeurs obtenues pour un nombre total de 32 échantillons dans le bassin versant de la rivière Leith au nord-ouest du Royaume-Uni. (Wallace et al., 2021)

Par ces résultats, il est constaté que, comparées aux prairies voisines, les bandes enherbées adjacentes aux haies allègent la structure du sol en diminuant nettement sa masse volumique apparente tout en augmentant sa porosité, favorisant ainsi une meilleure aération et un stockage plus conséquent de l'eau. De plus, elles augmentent la capacité d'infiltration : la perméabilité médiane du sol y est environ 22 à 27 fois plus élevée que sous les prairies, démontrant ainsi leur rôle clé pour améliorer rapidement l'infiltration des sols (Wallace et al., 2021).

Il est important de noter que, dans l'étude de Wallace et al. (2021), les mesures n'ont pas été réalisées directement sous la haie, mais dans la bande enherbée adjacente. Les résultats reflètent donc l'effet combiné de la haie et de la zone herbacée non pâturée, et ne peuvent être attribués uniquement à la haie. Ainsi, même si ces bandes enherbées ont été influencées par les racines, la litière et le microclimat induits par la haie, ces résultats ne seront pas intégrés dans notre recherche. Celle-ci se concentre uniquement sur les caractéristiques hydrauliques propres aux haies.

4.2 TABLEAU CROISÉ DES INDICATEURS EN FONCTION DES DIFFÉRENTS TYPES DE BARRIÈRES VÉGÉTALES

Le tableau suivant présente une synthèse croisée des principaux résultats hydrologiques relevés dans la littérature, mis en comparaison avec les différents types de haies matures.

(Clé de lecture : chaque couleur à l'intérieur du tableau relie un auteur aux résultats de son étude)

Paramètres clés – Haies matures

	Haies vives	Taillis linéaire	Alignement d'arbres	Miscanthus	Sources
	Subventionnés			Non subventionné	

Aérien					
LAI (Indice foliaire)					
Durée	<p>Lieu : Royaume-Uni (Sud-ouest) Type : haies matures (>100 ans) Période : juin-juillet-août Résultat : LAI Moyen : 6,8</p>		<p>Lieu : France (Grand Est) Type : chênes sessiles Période : annuelle Résultat : 8 jours après débourrement : 80% IMAX atteint LAI MAX : de 3,3 à 6,0</p> <p>Lieu : Royaume-Uni (Sud-ouest) Type : arbres isolés (principalement chênes pédonculés, frênes et sorbiers des oiseleurs) Période : juin-juillet-août Résultat : LAI Moyen : 3,9</p>		<p>Bréda & Granier, (1996)</p> <p>Pocock et al. (2010)</p>
Kc (Coef. cultural)					
Durée					

	Haies vives	Taillis linéaire	Alignement d'arbres	Miscanthus	Sources
--	-------------	------------------	---------------------	------------	---------

Surface					
n (coef Manning)	<p>Lieu : France (Normandie) Type : Haies à plat denses (50 tiges/mètre linéaire) Débit : 0,5 à 12 l/s/m Sol : limon moyen-sableux Résultat :</p>			<p>Lieu : France (Normandie) Type : Haies herbacées (miscanthus) Débit : 0,5 à 12 l/s/m Sol : limon moyen-sableux Résultat : n moyen de 0,63 s/m^{1/3}</p>	(Richet et al., 2017)

	n de 0,4 à 0,8 s/m ^{1/3}			<p>Lieu : Belgique (Wallonie)</p> <p>Type : Bandes de miscanthus dense (20 000 rhizomes/ha)</p> <p>Débit : 0,5 à 4 l/s/m</p> <p>Sol : limoneux</p> <p>Résultat : n de 0,37 à 0,80 s/m^{1/3}</p>	<p>(Richet et al., 2019)</p> <p>(Boutarfa et al., 2025)</p>
--	-----------------------------------	--	--	---	---

	Haies vives	Taillis linéaire	Alignement d'arbres	Miscanthus	Sources
--	-------------	------------------	---------------------	------------	---------

Souterrain					
Densité racinaire	<p>Lieu : France (Bretagne (Nord-ouest))</p> <p>Type : Haie bocagère de chênes sur talus perpendiculaire à la pente</p> <p>Sol : Sablo-limoneux</p> <p>Résultat : Général : 76% des racines en amont >> 23% en aval</p> <p>Détaillé : En amont : Dans les 8m 10-50 cm : 63% 50-100 cm : 35% 100-200 cm : 2% Au-delà des 8m 10-50 cm : 55% 50-100 cm : 40% 100-200 cm : 5%</p> <p>En aval : Dans les 8m 10-50 cm : 91% 50-100 cm : 8% 100-150 cm : 1% De 8 à 10m 10-50 cm : 99% 50-100 cm : 1%</p>		<p>Lieu : France (Sud)</p> <p>Type : Rangée de noyers</p> <p>Racines fines (<2 mm)</p> <p>10-50cm du sol</p> <p>Sol : Limono – argileux bien drainé</p> <p>Résultat : Valeur max 350 g/m² au pied des arbres Diminution avec la profondeur (2m) et la distance par rapport à la haie (6m)</p> <p>Lieu : France (Sud)</p> <p>Type : Peupliers (agroforesterie)</p> <p>Sol : Alluvial argilo-limoneux</p> <p>Résultat : Densité racinaire max : 3,8 km/m³ à 1,8m de profondeur</p> <p>Lieu : Royaume-Uni (Nord : Ecosse)</p> <p>Type : Forêt feuillue (500 ans) Forêt mixte (180 ans) Forêt saules (180 ans)</p> <p>Sol : Versant : Sableux grossiers</p> <p>Plaine : Limono-argileux</p> <p>Nombre moyen des racines >2mm par trous de mesure</p> <p>Résultat : Feuillue : 6,6</p>		<p>Cardinael et al. (2018)</p> <p>(Ghazavi et al., 2008)</p> <p>(Mulia & Dupraz, 2006)</p> <p>(Archer et al., 2013)</p>

			Mixte : 6,0 Saules : 3,8		
	Haies vives	Taillis linéaire	Alignement d'arbres	Miscanthus	Sources
Profondeur racinaire			<p>Lieu : Milieux tempérés Type : Forêt de feuillus Sol : Tout type de sol Résultat : Profondeur max = 2,9 m</p> <p>Lieu : France (Nord-Est et Ouest), Royaume-Uni Type : Chênes sessiles et pédonculés (32 ans et 100 ans) Sol : Tout type de sol Résultat : Plus de 1,4 m et 2 m de profondeur</p> <p>Lieu : France (Sud) Type : Peupliers et chênes en agroforesterie Sol : Alluvial argilo-limoneux Résultats : Peuplier : d90 = 2,03 m Noyer : d90 = 2,48 m</p>		<p>(Canadell et al., 1996)</p> <p>(Viaud et al., 2005)</p> <p>(Mulia & Dupraz, 2006)</p>
MO					
	Haies vives	Taillis linéaire	Alignement d'arbres	Miscanthus	Sources

Sol					
Influence de la haie sur la courbe de rétention					
θ _{sat} (Δ)	<p>Lieu : France (Bretagne) Type : Haies bocagères sur talus parallèles aux courbes de niveau Sol : Limoneux Résultat : <u>Par rapport à la distance de 40m :</u> 0-2m : 0,079 (+7%) 5-10m : 0,008 (+0,8%) 20-30m : -0,004 (-0,4%) <u>Par rapport à la profondeur de 70 cm :</u> 0-10cm : 0,083 (+8%) 20-30cm : 0,034 (+3%) 30-60cm : 0,011 (+1%)</p>				(Walter et al., 2003)

	<p>Lieu : Royaume-Uni (Ouest : Pays de Galles) Type : Haies plessées sur talus 30 ans Sol : limoneux bien drainé Résultat : <u>Par rapport au type de couvert</u> : Pâtures = 0,062 (+6%) Bandes enherbées = 0,087 (+8%) Cultures = 0,106 (+10%)</p> <p>Lieu : Belgique (Flandre) Type : Haies anciennes multi-strates 58 ans Sol : Sableux à sablo-limoneux Résultat : <u>Par rapport au type de couvert</u> : Haies fantômes = 0,091 (+9%) Bandes enherbées = 0,064 (+6%)</p>				(Holden et al., 2019)
					(Van Den Berge et al., 2021)
	Haies vives	Taillis linéaire	Alignement d'arbres	Miscanthus	Sources

Influence de la haie sur la courbe de conductivité hydraulique					
Ks (Δ) (m/s)	<p>Lieu : France (Normandie) Type : Haies à plat dense (50 tiges/mètre linéaire) Débit : 0,5 à 12 l/s/m Sol : limon moyen-sableux Résultat : <u>Par rapport à un sol limoneux sans haie</u> Moyenne : + 1500 % (x16)</p> <p>Lieu : Royaume-Uni (North Yorkshire) Type : haies plessées sur talus 30 ans Sol : limoneux bien drainé Résultat : <u>Par rapport aux pâturages et bandes enherbées</u> Entre + 240 % (x 5) et + 410 % (x3) <u>Par rapport aux cultures</u> + 3300 % (x34)</p>		<p>Lieu : Royaume-Uni (Nord : Ecosse) Type : Forêt feuillue (500 ans) Forêt mixte (180 ans) Forêt saules (180 ans) Sol : Versant : Sableux grossiers Plaine : Limono-argileux Résultat : <u>Par rapport aux prairies adjacentes</u> Feuillue : + 346 % (x4) Mixte : + 467 % (x6) Saules : + 700 % (x8)</p>	<p>Lieu : Belgique (Wallonie) Type : Bandes de miscanthus dense (20 000 rhizomes/ha) Débit : 0,5 à 4 l/s/m Sol : limoneux Résultat : <u>Par rapport à un sol limoneux sans haie</u> + 538% (x6)</p>	(Richet et al., 2017)
					(Boutarfa et al., 2025)
					(Archer et al., 2013)
					(Holden et al., 2019)

Tableau 17 : tableau croisé des indicateurs hydrologiques clés et types de barrières végétales

5 DISCUSSION DES RÉSULTATS

La discussion qui suit propose d'interpréter ces résultats au regard des différents types de haies, de leurs paramètres hydrologiques et de leur pertinence pour la modélisation.

LAI

En comparant les résultats des études de Bréda & Granier (1996) et Pocock et al. (2010), il apparaît que les indices foliaires mesurés concordent. Pocock et al. (2010) font état d'un LAI moyen de 3,9 pour les arbres isolés (chênes pédonculés, frênes et sorbiers), ce qui se situe dans la gamme de valeurs observées par Bréda & Granier (1996) pour les chênes sessiles en forêt (LAI de 3,3 à 6).

Toutefois, le LAI des arbres isolés apparaît plus élevé que le LAI minimum de la gamme de valeurs rapportées par Bréda & Granier (1996), certainement en raison de la faible compétition pour l'eau et la lumière en comparaison avec le milieu forestier, comme le mentionne Viaud et al. (2009). Cette compétition engendre un développement moindre de l'ensemble de la surface foliaire d'un arbre en forêt que celui d'un arbre isolé, où ce dernier peut se déployer et avoir un accès plus facile aux ressources hydriques, notamment lorsqu'il est situé en bas de versant à proximité d'une nappe « peu profonde » (Viaud et al., 2005).

En comparaison, le LAI moyen de 6,8 mesuré par Pocock et al. (2010) pour des haies matures, apparaît nettement supérieur à celui observé pour des arbres isolés ou chênes en forêt. Cette différence peut s'expliquer par la hauteur et la largeur de la haie mais également par sa diversité spécifique. En effet, l'ensemble des arbres et arbustes qui constituent une haie ne présente pas le même développement foliaire au cours de la saison, il varie en fonction des espèces végétales, ce qui donne une surface foliaire cumulée plus importante.

Plus spécifiquement, il est difficile de trouver des études qui caractérisent l'ensemble des paramètres végétatifs des haies au vu de leur diversité typologie et de la complexité des espèces végétales qui les composent.

Cette végétation ligneuse présente des développements foliaires différents selon la morphologie des feuilles et l'évolution de la canopée au cours de l'année. Pocock et al. (2010) en concluent ainsi que le LAI des haies dépend fortement de leur structure (hauteur et largeur) mais qu'il est aussi tributaire des essences qui la constituent.

L'effet de la composition spécifique des haies soulève plusieurs interrogations : une haie composée de trois espèces présenterait-elle le même LAI qu'une haie de même hauteur et largeur mais constituée de cinq espèces aux architectures foliaires différentes ? Autrement dit, à dimensions équivalentes, la diversité spécifique influence-t-elle directement le LAI ? Dans l'affirmative, dans quelle mesure cet indice foliaire varie-t-il en fonction du calendrier phénologique (débourrement, sénescence) et de la structure de la canopée ? Enfin, jusqu'à quel point la typologie de la haie pourrait-elle influencer l'humidité du sol ?

Sachant que le LAI est corrélé à la transpiration des arbres et que cette transpiration dépend de l'humidité du sol (Bréda & Granier, 1996), il serait intéressant de comparer le LAI d'un même peuplement d'arbres ou rangée d'arbres dans différents contextes climatiques européens, par exemple entre les régions méditerranéennes plus sèches et les régions tempérées plus humides.

Une telle comparaison permettrait de mettre en évidence l'influence du climat sur la disponibilité en eau du sol, en particulier lors des périodes de sécheresse, et d'évaluer son impact sur l'ampleur du LAI.

Dans cette perspective, il reste pertinent de s'intéresser aux choix des essences lors des programmes de plantation. En Région wallonne, au vu du comportement cyclique des sécheresses, l'observation d'arbres implantés dans des régions plus sèches aide à identifier les espèces les plus susceptibles de résister à des conditions plus arides à l'avenir, contribuant ainsi à une gestion durable du territoire.

Pour conclure, le LAI peut être considéré comme un indice intégrateur de la transpiration et de la disponibilité en eau du sol, reflétant à la fois la structure de la haie (hauteur, largeur et densité), sa composition spécifique et les conditions environnementales dans lesquelles elle se développe, en particulier le climat. (Bréda & Granier, 1996 ; Bréda, 2003)

Coefficient de Manning

La mise en parallèle des résultats issus des projets AREAS (Richet et al., 2017, 2019) et INTELL'EAU (Boutarfa et al., 2025) a permis de mieux appréhender le rôle de barrière hydraulique que jouent les différents types de haies.

Les recherches de Richet et al. (2017) sur les haies arbustives ont montré que la densité des tiges était un facteur déterminant dans le ralentissement des eaux, avec des valeurs de Manning atteignant 0,4 à 0,8 s/m^{1/3} pour des haies matures de grande densité (50 tiges/m linéaire) en comparaison à des haies plus jeunes.

Quelques années plus tard, Richet et al. (2019) ont expérimenté les haies herbacées de miscanthus et ont obtenu des coefficients de Manning comparables avec un n moyen de 0,63 s/m^{1/3} pour des haies atteignant leur efficacité en 12 à 36 mois seulement. Plus récemment, Boutarfa et al. (2025), dans le cadre du projet belge Intell'eau, a confirmé cette tendance avec des bandes de miscanthus de 4 ans présentant des valeurs de Manning comprises entre 0,37 et 0,80 s/m^{1/3}.

Compte tenu de leur jeune âge, les haies herbacées de miscanthus donnent rapidement des résultats de Manning très intéressants après leur mise en place, démontrant ainsi une efficacité hydraulique précoce. En comparaison, les haies arbustives n'atteignent des valeurs similaires qu'après 7 à 15 ans, le temps que leur densité de tiges devienne suffisante pour ralentir efficacement le ruissellement.

Cependant, la comparaison doit être nuancée : Richet et al. (2017, 2019) lors de ces expérimentations ont testé des débits allant jusqu'à 12 L/s/m alors que les essais Intell'eau (2021) se sont limités à 4 L/s/m, peut-être en raison de la faible rigidité des tiges de miscanthus ou de contraintes de terrain. Cela pose la question de la résistance hydraulique du miscanthus en cas de fortes crues. Est-il assez résistant lors d'épisodes de pluies intenses ? Cette végétation herbacée souple ne risque-t-elle pas de se coucher tout simplement sous la puissance de l'eau ?

Sur le plan pratique, l'avantage du miscanthus en plus de son efficacité rapide, est certainement sa valorisation potentielle en biomasse. Cependant il comporte certaines contraintes comme des coûts de mise en place, d'entretien pendant les premières années (Richet et al., 2019) ainsi qu'un risque d'invasivité (Bylak et al., 2025), qui impose une surveillance supplémentaire par rapport aux haies arbustives. Ces dernières, plus pérennes et moins exigeantes en gestion, nécessitent en revanche un temps plus long avant de devenir efficaces.

En conclusion, les haies arbustives restent une solution durable et robuste sur le long terme tandis que les haies herbacées de miscanthus offrent une alternative intéressante pour des aménagements rapides. Une approche combinant différents types de barrières végétatives, comme le suggèrent Ouvry et al. (2012), apparaît dès lors comme une stratégie pertinente pour limiter le ruissellement à la fois à court et à long terme.

Toutefois, la question de l'occupation surfacique de ces combinaisons, qui impliquent une perte de surface cultivable, fait débat. Cette contrainte représente un effort économique important pour les agriculteurs et interroge sur la faisabilité réelle de ces aménagements dans leur pratique quotidienne.

Dans un contexte marqué par la récurrence des événements hydrologiques extrêmes dans notre province, la mise en place rapide de dispositifs de lutte contre le ruissellement apparaît prioritaire. Les haies bénéficient déjà d'un appui financier à la plantation, complété par une aide annuelle dans le cadre de l'éco-régime pour la présence d'éléments écologiques (Natagriwal, 2024b). En revanche, le miscanthus n'est actuellement pas pris en compte dans les dispositifs subventionnés par la Région wallonne.

De plus, ni les haies, ni le miscanthus ne sont intégrés, au même titre que les fossés, noues ou encore les mares, parmi les dispositifs reconnus comme rendant des services hydriques (Natagriwal, 2024a) alors qu'ils participent pourtant également à la gestion du ruissellement.

Ne pourrait-on pas envisager leur intégration aux mesures de soutien à la mise en place de dispositifs non productifs, tels que prévus dans la PAC 2023-2027 ? Pour le miscanthus en particulier, cela encouragerait les agriculteurs à opter pour une culture pouvant jouer un rôle stratégique dans les zones à risque de ruissellement tout en générant des revenus grâce à la valorisation de la biomasse comme combustible, litière animale, paillage horticole et maraîcher ou encore matériau d'isolation. (Valbiom, 2016)

Densité racinaire

La diversité des indicateurs utilisés dans les quatre travaux qui caractérisent la densité racinaire rend les résultats difficiles à comparer entre eux.

En effet, les études disponibles s'appuient sur des approches très différentes. Cardinael et al. (2018) travaillant dans le sud de la France sur un système agroforestier de noyers implantés sur un sol limono-argileux bien drainé, ont quantifié la biomasse racinaire fine (g/m^2) en fonction de la profondeur et de la distance aux arbres. Mulia & Dupraz (2006), également dans le sud de la France mais sur un sol alluvial argilo-limoneux, ont analysé le noyer et le peuplier en agroforesterie et en forêts pures en utilisant des indices de profondeur (d50, d90) et des densités racinaires exprimées en km/m^3 .

Ghazavi et al. (2008), en Bretagne dans le nord-ouest de la France, se sont concentrés sur une haie bocagère de chênes sessiles implantée sur un limon sableux et ont décrit la répartition spatiale des racines en pourcentage par horizon de sol et selon la position amont ou aval de la haie.

Enfin, Archer et al. (2013), en Écosse dans des forêts tempérées humides (forêt feuillue ancienne de 500 ans, forêt mixte de 180 ans et forêt de saules de 180 ans), ont évalué la densité racinaire en comptant le nombre moyen de racines >2 mm par trou de mesure.

Ces différences entre les espèces étudiées, les types de systèmes (agroforesterie, forêts pures, haies bocagères, forêts anciennes) et les contextes pédoclimatiques (Sud de la France, Bretagne, Écosse) compliquent la réalisation d'une synthèse claire et robuste. Même si toutes ces études décrivent la densité racinaire, elles se distinguent par les unités de mesure et les méthodologies employées, ce qui rend les comparaisons hasardeuses.

La seule analyse possible est la mise en évidence des tendances générales : toutes les études convergent vers une forte concentration des racines dans les 50 premiers centimètres du sol et une plasticité racinaire qui permet aux arbres d'ajuster la profondeur et la répartition de leurs racines en fonction de la compétition avec les cultures (Mulia & Dupraz, 2006), de la topographie et de la disponibilité en eau (Ghazavi et al., 2008).

Cette hétérogénéité empêche l'intégration de ces résultats dans un modèle hydrologique. Pour pouvoir transposer ces données dans des modèles comme MIKE SHE, il est indispensable d'harmoniser les mesures et de définir un indicateur de densité racinaire commun.

Profondeur racinaire

La comparaison des études présentées dans ce travail met en évidence des résultats globalement similaires, même si la prudence reste de mise au regard du manque d'informations détaillées concernant le type de sol dans les études de Canadell et al. (1996) et Viaud et al. (2005), celles-ci étant des revues de littérature.

Dans leur synthèse sur les forêts feuillues tempérées, Canadell et al. (1996) rapportent une profondeur maximale moyenne de l'ordre de 2,9 m, ce qui reste une valeur très générale. Dans leur revue de littérature, Viaud et al. (2005) indiquent que les chênes sessiles et pédonculés en France (Nord-Est et Ouest) et au Royaume-Uni atteignent généralement des profondeurs comprises entre 1,4 et 2 m. Ces références, provenant de plusieurs études, sont plus précises en termes de localisation et d'espèces végétales, même si la composante sol n'y est pas détaillée, alors qu'elle constitue un facteur déterminant du développement racinaire. Ces résultats peuvent néanmoins être comparés à ceux de Mulia & Dupraz (2006) dans le sud de la France, qui ont estimé, via l'indicateur d90, que 90 % des racines profondes se situent à 2,03 m pour les peupliers et à 2,48 m pour les noyers dans un système en agroforesterie.

Ces données suggèrent une possible tendance Nord-Sud : les chênes implantés dans le Sud présenteraient des enracinements plus profonds que dans les régions plus au nord. Cela s'expliquerait probablement par la nécessité d'explorer plus profondément le sol pour accéder à la ressource en eau en raison du déficit pluviométrique dans ces régions. Cette hypothèse reste cependant à confirmer en raison du faible nombre de cas étudiés.

On peut également considérer que ces arbres en système agroforestier sont soumis à une compétition avec les cultures environnantes pour l'accès aux ressources dans les horizons superficiels. Pour pallier cette concurrence, ceux-ci adaptent leur stratégie en explorant les horizons plus profonds afin de profiter des ressources inaccessibles aux cultures, ce qui pourrait expliquer les valeurs plus élevées rapportées par Mulia & Dupraz (2006). Cette hypothèse doit toutefois être considérée avec prudence en raison du manque d'informations sur les systèmes de cultures associés aux arbres dans les travaux de Viaud et al. (2005). De plus, les variations liées aux essences étudiées (noyer, peuplier, chêne), au type de sol et aux différences méthodologiques rendent les comparaisons fragiles et soulignent la nécessité d'uniformiser les indicateurs (d50, d90, distribution par horizon) pour permettre une meilleure intégration dans les modèles hydrologiques.

Teneur en eau à saturation

Les trois études confirment un rôle structurant des haies sur la porosité des sols.

En Bretagne, les recherches de Walter et al. (2003) menées sur des sols limoneux montrent que, par rapport aux zones éloignées de plus de 40m, les haies bocagères sur talus améliorent la porosité de 7% dans les deux premiers mètres de largeur à partir de la haie, pour ensuite chuter à 0,8% à 10m et devenir négative dans les 20 à 30 m. Dans un profil de sol de 70 cm, la porosité est supérieure de 8% dans les 10 premiers centimètres puis descend à 3 % entre 20 et 30 cm, jusqu'à 1% entre 30 et 60 cm. L'effet se concentre donc surtout dans les 30 premiers centimètres de profondeur et dans les deux premiers mètres de largeur de part et d'autre de la haie.

En Belgique, Van Den Berge et al. (2021) ont mesuré, sous des haies multi-strates anciennes (58 ans), une porosité de 57%, supérieure de 9% à celle des haies fantômes et de 6% à celle des bandes enherbées.

Au Pays de Galles, Holden et al. (2019) ont observés, sous des haies plessées traditionnelles plus jeunes (30 ans), une porosité de 52%, supérieure de 6% à celle des pâtures, de 8% à celle des bandes enherbées et de 10% à celle des cultures.

Ces différents résultats montrent que les haies améliorent la structure du sol aussi bien en surface qu'en profondeur et induisent globalement un gain de porosité de l'ordre de 6 à 10% par rapport aux couverts voisins. (Holden et al., 2019; Van Den Berge et al., 2021; Walter et al., 2003)

Une comparaison plus spécifique entre les haies et les bandes enherbées met en évidence une porosité sous haies plus élevée de 57% chez Van Den Berge et al. (2021) que chez Holden et al. (2019) (52%) avec respectivement une porosité supérieure de 6% et de 8% par rapport aux bandes enherbées. Ces écarts pourraient s'expliquer à la fois par la texture du sol (sablo-limoneuse, plus légère, en Belgique contre limoneuse au Pays de Galles, plus sensible à la compaction), par l'âge et le type de haie (multi-strates anciennes contre haies plessée plus jeunes) ainsi que par la profondeur d'échantillonnage (0-30 cm contre 0-50 cm).

En conclusion, la comparaison entre les études doit donc être nuancée en fonction de la texture du sol, de l'âge et du type de haie ainsi que de la profondeur d'échantillonnage.

Les valeurs de masse volumique apparente réunies dans ces études ont été converties en teneur en eau à saturation (θ_s) et pourront être utilisées dans MIKE SHE pour paramétrer les courbes de rétention. Les $\Delta \theta_s$, représentant l'écart entre les haies et les couverts de référence, permettront d'ajuster les gammes de paramètres existants et de rendre plus concret l'effet "haie" dans les scénarios comparatifs.

Conductivité hydraulique à saturation

Dans l'ensemble, les quatre études convergent : les couverts ligneux (haies, bosquets, forêts feuillues) et herbacés (miscanthus) augmentent nettement la conductivité hydraulique saturée par rapport aux prairies et aux cultures, grâce à la macroporosité engendrée par les racines et la faune du sol, ainsi qu'à une plus faible compaction due aux passages d'engins agricoles et au piétinement des animaux.

Des différences sont toutefois perceptibles selon la méthode de mesure, la référence de comparaison et les caractéristiques pédologiques et paysagères.

En Écosse, Archer et al. (2013) montrent que, sur les hauts de pente, les forêts de feuillus présentent des K_s 4 à 6 fois supérieurs à ceux des prairies voisines, en lien avec le nombre de racines de plus de 2 mm. En revanche, la plaine alluviale dominée par des saules affiche un ΔK_s très élevé (+700%). Cette valeur découle du fait que

les deux Ks comparés sont très faibles (8 mm/h sous saules contre seulement 1 mm/h pour la prairie de référence), ce qui conduit à un pourcentage artificiellement élevé.

Cette faible conductivité hydraulique pourrait être liée au contexte de plaine limono-argileuse à nappe peu profonde, où la petite taille des particules de limon et d'argile réduit la connexion avec les macropores. La saturation fréquente du sol entraîne des conditions de saturation prolongée et de déficit en oxygène, qui freinent le développement racinaire et l'activité biologique, limitant ainsi la création et la stabilité des macropores. De plus, cette configuration favorise le colmatage par des particules fines provenant par exemple des alluvions. Enfin, l'accès facilité à l'eau réduit la nécessité pour le saule d'étendre son réseau racinaire.

En conclusion, la faible perméabilité du sol combinée à une saturation récurrente en eau influence fortement le Ks et pourrait expliquer la faible valeur de conductivité hydraulique observée sous le peuplement de saules.

Dans les travaux de Richet et al. (2017), réalisés sur des sols limoneux, les haies à plat très denses montrent des capacités d'infiltration très élevées avec une moyenne de 400 mm/h, 16 fois supérieure à la valeur de référence de la FAO pour ce type de sol. Ces résultats reflètent à la fois l'effet de la densité de tiges, qui accroît la porosité, mais également celui de la méthodologie utilisée (mesure à débit imposé directement au pied de la haie, captant un flux concentré).

A l'inverse, Holden et al. (2019) ont quantifié, en laboratoire pour des haies plessées, un Ks plus modéré d'environ 102 mm/h, mais 34 fois plus élevé que sous cultures et 3 à 5 fois plus élevé que sous prairies et bandes enherbées.

Enfin, Boutarfa et al. (2025) apportent des résultats récents sur les bandes de miscanthus implantées sur des sols limoneux. L'étude rapporte une conductivité hydraulique saturée moyenne de 83 ± 20 mm/h, soit environ +538 % par rapport à la valeur de référence de la FAO pour ce type de sol, ce qui correspond à une valeur environ six fois plus élevée. Ces résultats confirment la capacité du miscanthus à accroître l'infiltration par rapport à un sol nu ou enherbé, même si son efficacité reste inférieure à celle observée sous d'autres dispositifs ligneux plus denses, comme les haies arbustives.

Ces quatre études confirment que l'ampleur de l'augmentation de Ks dépend non seulement de la référence utilisée pour la comparaison (sol nu, prairie, culture) mais également de la densité et de l'âge des haies ou boisements, ainsi que des caractéristiques pédologiques locales (sols plus drainants ou plus hydromorphes). Elles mettent en évidence le rôle bénéfique des structures ligneuses et herbacées pour améliorer l'infiltration par rapport aux couverts voisins dépourvus de telles structures.

Toutefois, bien que ces études se rejoignent, les résultats ne sont pas directement comparables sans une harmonisation des méthodes, des références, des profondeurs d'échantillonnage et du contexte. En effet, Richet et al. (2017) présentent le Ks comme une capacité d'infiltration mesurée au pied de la haie sous débit imposé, Holden et al. (2019) estiment un Ks de surface reflétant un flux plus diffus sous haie, Archer et al. (2013)

mettent en évidence un effet d'occupation du sol en fonction de la position topographique et de la texture et Boutarfa et al. (2025) s'appuient sur des simulations de ruissellement à débit contrôlé pour estimer l'infiltration au sein des bandes de miscanthus.

Pour des comparaisons plus rigoureuses, il serait nécessaire d'exprimer les écarts en facteurs par rapport à une même référence locale et d'harmoniser les profondeurs et conditions de mesure. De cette manière, les ΔKs pourraient être utilisés plus aisément pour quantifier le gain d'infiltration lié aux haies, comparer les sites entre eux, et les intégrer de manière cohérente dans les paramètres de modèles hydrologiques tels que MIKE SHE

Absence de résultats

L'analyse de la littérature en contexte européen à climat tempéré met en évidence un manque criant de données chiffrées concernant les paramètres hydrologiques des haies, en particulier pour les haies arbustives et le miscanthus. La plupart des travaux disponibles s'intéressent plutôt à la biodiversité qu'elles abritent, à leur rôle de brise-vent, à leur fonction de corridor écologique ou encore à d'autres services écosystémiques, mais rarement à leur influence directe sur l'hydrologie mesurée à travers des expériences de terrain. Leur rôle dans la réduction de l'érosion et l'amélioration de l'infiltration est régulièrement cité, mais reste peu étudié de manière expérimentale, et encore moins caractérisé en fonction des espèces indigènes qui composent les haies de nos contrées.

Les données disponibles concernent surtout des haies bocagères composées d'arbres, ce qui explique que la colonne « taillis linéaires » du tableau comparatif soit restée vide (Tableau 17). Les haies recépées n'attirent visiblement pas l'attention des chercheurs, probablement parce qu'elles ne sont pas perçues comme ayant une réelle vocation à limiter le ruissellement de manière efficace. À l'inverse, les forêts, bosquets et alignements d'arbres font l'objet de plus de recherches, ce qui explique la plus grande disponibilité de données pour ces catégories.

Cependant, certains paramètres hydrologiques tels que le coefficient cultural (Kc) ou la teneur en matière organique du sol, sont très peu renseignés dans les études européennes, accentuant les lacunes observées dans mon tableau comparatif. Enfin, les rares études chiffrées consacrées au miscanthus en Europe commencent seulement à émerger et restent trop limitées pour caractériser précisément son rôle hydrologique.

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce mémoire a pour objectif de caractériser le rôle hydrologique des haies dans les paysages agricoles à travers l'étude de leur typologie et de leurs paramètres hydrologiques, afin d'affiner la représentation dans la modélisation hydrologique.

La première hypothèse de ce travail, selon laquelle les haies contribuent à la régulation hydrologique des bassins versants en favorisant l'infiltration et l'évapotranspiration réelle, est globalement confirmée. Les valeurs de LAI indiquent une forte capacité évapotranspirante des haies par rapport aux arbres isolés. Les coefficients de Manning soulignent leur efficacité à ralentir le ruissellement, aussi bien pour les haies vives que pour le miscanthus. Par rapport aux parcelles adjacentes, les haies présentent des teneurs en eau à saturation plus élevées, signe d'une porosité renforcée. Les valeurs de Ks supérieures confirment le rôle d'infiltration des haies vives et du miscanthus en comparaison aux autres occupations du sol. En revanche, les résultats concernant la profondeur et la distribution racinaire sont difficilement comparables, les unités de mesure et les méthodologies employées étant trop différentes pour permettre une conclusion fiable.

La seconde hypothèse, selon laquelle l'efficacité varie selon la typologie de haies et les caractéristiques pédologiques, est plus difficile à vérifier. Les typologies de haies ne sont pas suffisamment différenciées dans les études répertoriées, ce qui rend les comparaisons difficiles. En effet, la catégorie « haies vives » apparaît comme la mieux documentée mais regroupe en réalité des haies aux caractéristiques très différentes (haies multi-strates, haies plessées, haies clôtures). Les alignements d'arbres s'appuient sur des données issues de systèmes agroforestiers et forestiers, peu représentatives du contexte des haies. L'absence de données pour les taillis linéaires dans la littérature est révélatrice. Le miscanthus, quant à lui, présente des résultats encourageants mais reste encore trop peu étudié pour couvrir l'ensemble des paramètres hydrologiques.

En conclusion, ce travail met en évidence de nombreux paramètres encore peu caractérisés de manière quantitative, comme le reflètent les cases vides du tableau d'analyse (Tableau 17). Cette rareté des données identifiées contraste avec les plaidoyers actuels qui valorisent les haies comme solutions basées sur la nature pour lutter contre le ruissellement et l'érosion.

Ce constat souligne la nécessité de clarifier les typologies de haies, sur le plan structural et fonctionnel, à l'échelle européenne, afin de rendre les études comparables et cohérentes. Il apparaît également essentiel de mener davantage d'études de terrain afin d'obtenir des données chiffrées fiables et récentes, ainsi que d'engager une réflexion sur la manière d'intégrer ces paramètres hydrologiques dans les modèles hydrologiques, en tenant compte des contraintes de résolution spatiale.

7 BIBLIOGRAPHIE

- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., & Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2 : Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87(1), 61-77. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90115-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90115-0)
- Afac-Agroforesteries. (2019). *Référentiel national sur la typologie des haies : Modalités pour une gestion durable* (No. 2^e édition). Afac-Agroforesteries.
- Allen, R. G., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). *FAO 56—Irrigation and Drainage Paper—Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements*.
- Ambroise, B. (2005). Génèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : 2 - Modélisation systémique et dynamique. *Revue des sciences de l'eau*, 12(1), 125-153. <https://doi.org/10.7202/705346ar>
- Ameline, M. (2019). *Diagnostic hydrique et estimation de la production de la culture de maïs : Vers la mise en place d'un service tout temps*. <https://www.theses.fr/2019TOU30314/document>
- Archambeaud, M. (avec Thomas, F.). (2023). *Les sols agricoles : Comprendre, observer, diagnostiquer* (2e édition.). Éditions France agricole.
- Archer, N. A. L., Bonell, M., Coles, N., MacDonald, A. M., Auton, C. A., & Stevenson, R. (2013). Soil characteristics and landcover relationships on soil hydraulic conductivity at a hillslope scale : A view towards local flood management. *Journal of Hydrology*, 497, 208-222. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.05.043>
- Awaf. (2020). *Haie, si on plantait ? Guide interactif pour la conception et la gestion des haies multifonctionnelles—MaHaie.be*. AWAf asbl. <http://www.awaf.be/>
- Bansept, A. (2013). Eau et forêt. 1re partie : L'influence des arbres sur la quantité des eaux. *Revue forestière française*, 65(2), 145-162. <https://doi.org/10.4267/2042/51600>
- Bauer, A., & Davin, J. (2013). *Livret d'accompagnement des supports de sensibilisation : Haie & bocage*. Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage (ONCFS), Pôle Bocage.
- Beckers, E., & Degre, A. (2011). *Revue bibliographique : La prise en compte des transferts horizontaux dans les modèles hydrologiques*.
- Benhadj, I. (2009). *Observation spatiale de l'irrigation d'agrosystèmes semi-arides et Gestion durable de la ressource en eau en plaine de Marrakech*. [Université Toulouse III – Paul Sabatier]. https://www.researchgate.net/publication/38958595_Observation_spatiale_de_l'irrigation_d'agrosystemes_semi-arides_et_Gestion_durable_de_la_resource_en_eau_en_plaine_de_Marrakech
- Boutarfa, A., Benabdelouahab, T., Aboutayeb, R., Manssens, G., Swert, G., Brostaux, Y., Bielders, C., & Degré, A. (2025). *Impact of Miscanthus giganteus and short-rotation coppice vegetative barriers on surface runoff velocity*.
- Bréda. (2003). Ground-based measurements of leaf area index : A review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 54(392), 2403-2417. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg263>
- Bréda, N., & Granier, A. (1996). Intra- and interannual variations of transpiration, leaf area index and radial growth of a sessile oak stand (*Quercus petraea*). *Annales Des Sciences Forestières*, 53(2-3), 521-536. <https://doi.org/10.1051/forest:19960232>
- Bruyn, B. de. (2004). *Étude de la vulnérabilité des eaux aux produits phytosanitaires : Indicateur environnemental et modèle mécaniste, en vue d'une meilleure gestion du bassin versant de la Leysse (Savoie)* [These de doctorat, Université Joseph Fourier (Grenoble, Isère, France ; 1971-2015)]. <https://theses.fr/2004GRE10002>
- Bylak, A., Bobiec, A., Bobiec, M., Kukuła, K., & Low, T. (2025). Early warning of two emerging plant invaders in Europe. *Scientific Reports*, 15(1), 11666. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95582-x>

- Calvet, R. (2013). *Le sol: Vol. 2ème édition* (France Agricole).
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Péan, C. (2023). *IPCC, 2023 : Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.* (First). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Canadell, J., Jackson, R. B., Ehleringer, J. B., Mooney, H. A., Sala, O. E., & Schulze, E.-D. (1996). Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia*, *108*(4), 583-595. <https://doi.org/10.1007/BF00329030>
- Cardinael, R., Guenet, B., Chevallier, T., Dupraz, C., Cozzi, T., & Chenu, C. (2018). High organic inputs explain shallow and deep SOC storage in a long-term agroforestry system – combining experimental and modeling approaches. *Biogeosciences*, *15*(1), 297-317. <https://doi.org/10.5194/bg-15-297-2018>
- Collier, M. J. (2021). Are field boundary hedgerows the earliest example of a nature-based solution? *Environmental Science & Policy*, *120*, 73-80. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.02.008>
- Contrat de Rivière Vesdre. (s. d.-a). *Contrat de Rivière Vesdre—Le Contrat de Rivière Vesdre*. Consulté 21 septembre 2025, à l'adresse <https://www.crvsudre.be/contrat-de-riviere/le-contrat-de-riviere-vesdre>
- Contrat de Rivière Vesdre. (s. d.-b). *Inondations*. Consulté 6 septembre 2025, à l'adresse <https://www.crvsudre.be/territoire/inondations>
- Contrat de Rivière Vesdre. (2018). *Brochure du Contrat de Rivière du sous-bassin hydrographique de la Vesdre*. Contrat de Rivière Vesdre asbl. https://www.crvsudre.be/images/ressources/publications/Brochure%20CRV_ok.pdf
- Dautrebande, S. (avec Cordonnier, H., Thirion, M., & Biolders, C.). (2006). *Lutter contre l'érosion des terres*. Ministère de la Région Wallonne. Direction Générale de l'Agriculture.
- Degré, A., Guillaume, B., Michez, A., Bonaventure, N., Leyh, E., di Maggio, L., & Rabouli, S. (2024). *Modélisation hydrologique du bassin versant de la Vesdre—Projet ModRec*. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/314437>
- Desmet, F. (2025). *L'évolution du climat (2025)*. Agriculture Wallonie. [https://agriculture.wallonie.be/files/accueil/Recherche%20et%20d%3%a9veloppement/Secheresse/%c3%a9volution%20du%20climat/L'%c3%a9volution%20du%20climat%20\(2025\)-1.pdf](https://agriculture.wallonie.be/files/accueil/Recherche%20et%20d%3%a9veloppement/Secheresse/%c3%a9volution%20du%20climat/L'%c3%a9volution%20du%20climat%20(2025)-1.pdf)
- Duchène, O. (2019, décembre 11). *Comprendre la profondeur des sols – Isara*. <https://blog.isara.fr/comprendre-la-profondeur-des-sols/>
- EEA. (2002, mai 31). *Europe's biodiversity—Biogeographical regions and seas*. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/report_2002_0524_154909
- EEA. (2025, juillet 15). *Extreme weather : Floods, droughts and heatwaves*. <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/extreme-weather-floods-droughts-and-heatwaves>
- FAO. (s. d.). *Propriétés physiques – Eau du sol disponible*. FAO Soils Portal. Consulté 17 septembre 2025, à l'adresse <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/proprietes-du-sol/proprietes-physiques/fr/>
- Frankl, A., De Boever, M., Bodyn, J., Buysens, S., Rosseel, L., Deprez, S., Biolders, C., Dégre, A., & Stokes, A. (2021). Report on the effectiveness of vegetative barriers to regulate simulated fluxes of runoff and sediment in open agricultural landscapes (Flanders, Belgium). *Land Degradation & Development*, *32*(15), 4445-4449. <https://doi.org/10.1002/ldr.4048>
- Frankl, A., Nyssen, J., Vanmaercke, M., & Poesen, J. (2021). Gully prevention and control : Techniques, failures and effectiveness. *Earth Surface Processes and Landforms*, *46*(1), 220-238. <https://doi.org/10.1002/esp.5033>

- Ghazavi, G., Thomas, Z., Hamon, Y., Marie, J. C., Corson, M., & Merot, P. (2008). Hedgerow impacts on soil-water transfer due to rainfall interception and root-water uptake. *Hydrological Processes*, 22(24), 4723-4735. <https://doi.org/10.1002/hyp.7081>
- GIEC 2014 : Changements climatiques : rapport de synthèse : contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* (avec Pachauri, R. K., & Meyer, L. A.). (2015). GIEC.
- Gillain, D., Balleux, P., Dufosse, A., Peaudecerf, A., Wartelle, R., & Daudon, J. (2021). *Guide technique de l'agroforesterie : Préparer, installer, entretenir et valoriser son projet*. Hainaut Développement. <https://www.transagroforest.eu/fr/>
- Giser. (2023). *Fascines et haies denses (Fiche technique 2.01)*. Service public de Wallonie – Agriculture, Ressources naturelles, Environnement. <https://inondations.wallonie.be/home/ruissellement/ruissellement-naturel-et-en-zone-rurale/techniques-et-amenagements-pour-gerer-le-ruissellement.html>
- Gouvernement wallon. (2022). *Inondations de juillet 2021 : Bilan et perspectives*. Service public de Wallonie. <https://www.wallonie.be/sites/default/files/2022-07/%5BCP%5D%20-%20Inondations%20de%20juillet%202021%20-%20Bilan%20et%20perspectives.pdf>
- Guyot, G. (2013). *Climatologie de l'environnement* (2ème). Dunod. <https://www.dunod.com/sciences-techniques/climatologie-environnement>
- Herbst, M., Roberts, J. M., Rosier, P. T., & Gowing, D. J. (2006). Measuring and modelling the rainfall interception loss by hedgerows in southern England. *Agricultural and Forest Meteorology*, 141(2), 244-256. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.10.012>
- Hillel, D. (avec Warrick, A. W., Baker, R. S., & Rosenzweig, C.). (1998). *Environmental soil physics*. Academic Press.
- Holden, J., Grayson, R. P., Berdeni, D., Bird, S., Chapman, P. J., Edmondson, J. L., Firbank, L. G., Helgason, T., Hodson, M. E., Hunt, S. F. P., Jones, D. T., Lappage, M. G., Marshall-Harries, E., Nelson, M., Prendergast-Miller, M., Shaw, H., Wade, R. N., & Leake, J. R. (2019). The role of hedgerows in soil functioning within agricultural landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 273, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.11.027>
- IPCC. (2023). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability : Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- IRM. (2025). *IRM - Mars*. KMI. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/bilans-climatologiques/2025/mars>
- Jacobs, S. R., Webber, H., Niether, W., Grahmann, K., Lüttschwager, D., Schwartz, C., Breuer, L., & Bellingrath-Kimura, S. D. (2022). Modification of the microclimate and water balance through the integration of trees into temperate cropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 323, 109065. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109065>
- La Vallée de la Vesdre. (s. d.). *La Vallée de la Vesdre : Un schéma stratégique pluridisciplinaire*. Climate Chance. Consulté 4 septembre 2025, à l'adresse <https://www.climate-chance.org/bonne-pratique/la-vallee-de-la-vesdre-schema-strategique-pluridisciplinaire/>
- Le plessage des haies*. (s. d.). Consulté 14 septembre 2025, à l'adresse http://www.haiesvives.org/html/plessage_des_haies.htm#
- Ma, J., Li, Z., Li, P., Ma, B., Xiao, L., Cui, Z., Wang, Z., & Min, Z. (2024). Effect of mixed plant roots on saturated hydraulic conductivity and saturated water content of soil in the loess region. *Agricultural Water Management*, 295, 108784. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108784>
- Ma, L., He, C., Bian, H., & Sheng, L. (2016). MIKE SHE modeling of ecohydrological processes : Merits, applications, and challenges. *Ecological Engineering*, 96, 137-149. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.008>

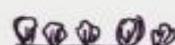
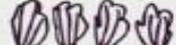
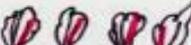
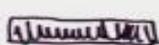
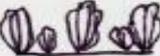
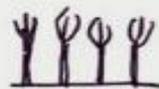
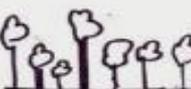
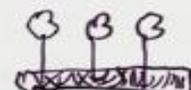
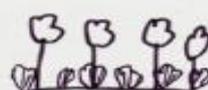
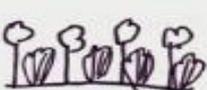
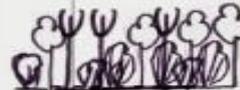
- Merot, Ph., Gascuel-Oudou, C., Walter, C., Zhang, X., & Molenat, J. (1999). Influence du réseau de haies des paysages bocagers sur le cheminement de l'eau de surface. *Revue des sciences de l'eau*, 12(1), 23-44. <https://doi.org/10.7202/705342ar>
- Moniteur belge. (2023, octobre 18). *Arrêté du Gouvernement wallon du 5 octobre 2023 reconnaissant comme calamité agricole la sécheresse survenue du 1er juillet 2022 au 31 août 2022*. Gouvernement wallon. https://www.ejustice.just.fgov.be/cgi/article_body.pl?language=fr&caller=summary&pub_date=23-10-18&numac=2023045867
- Montgomery, I., Caruso, T., & Reid, N. (2020). Hedgerows as Ecosystems : Service Delivery, Management, and Restoration. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 51(Volume 51, 2020), 81-102. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-012120-100346>
- Mualem, Y. (1976). New model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513-522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
- Mulia, R., & Dupraz, C. (2006). Unusual Fine Root Distributions of Two Deciduous Tree Species in Southern France : What Consequences for Modelling of Tree Root Dynamics? *Plant and Soil*, 281(1), 71-85. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-3770-6>
- Natagriwal. (2024a). *Aides aux aménagements non productifs dans les exploitations agricoles 2023-2027*. Cellule Protection des sols (SPW & Natagriwal).
- Natagriwal. (2024b). *Haie d'honneur aux arbres et vergers : Subventions à la plantation et à l'entretien en Wallonie*. Natagriwal asbl.
- OFB. (s. d.). *Connaître la haie et le bocage, leurs composantes et les enjeux*. Le portail technique de l'OFB. Consulté 21 septembre 2025, à l'adresse <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/852>
- OPTAIN. (2021). *General leaflet OPTAIN*. OPTAIN Project Consortium. <https://www.optain.eu/>
- Oreskes, N., Shrader-Frechette, K., & Belitz, K. (1994). Verification, validation, and confirmation of numerical models in the Earth sciences. *Science (New York, N.Y.)*, 263(5147), 641-646. <https://doi.org/10.1126/science.263.5147.641>
- Osborn, D. (2020). *Difference between Taproot and Fibrous root*. Difference Between. <https://www.differencebetween.net/science/nature/difference-between-taproot-and-fibrous-root/>
- Ouvry, J.-F., Richet, J.-B., Bricard, O., Lheriteau, M., Bouzid, M., & Saunier, M. (2012). *Fascines & haies pour réduire les effets du ruissellement érosif : Caractérisation de l'efficacité et conditions d'utilisation*. Association Régionale pour l'Étude et l'Amélioration des Sols (AREAS). <https://dev.areas-asso.fr/ressources/documents/fascines-et-haies-pour-reduire-les-effets-du-ruissellement-erosif/>
- Ouvry, J.-F., Richet, J.-B., & Saunier, M. (2019). Le « rebocagement » : Une réponse pertinente face aux enjeux érosifs ? Retour d'expérience du Pays de Caux: *Sciences Eaux & Territoires, Numéro 30(4)*, 54-59. <https://doi.org/10.3917/set.030.0054>
- Parc naturel régional du Verdon. (2024). *Concevoir, planter, entretenir des haies. Guide pratique* [Guide pratique]. Parc naturel régional du Verdon.
- Parlement wallon. (2021). *Décret instituant un régime particulier d'indemnisation de certains dommages causés par les inondations et pluies abondantes survenues du 14 au 16 juillet 2021 ainsi que le 24 juillet 2021 et reconnues en tant que calamité naturelle publique*. Parlement Wallon. <https://www.parlement-wallonie.be/pwpages?iddoc=106768&p=doc-recherche-de>
- Paysan Breton. (2025, juillet 11). 1 ferme sur 3 restera-t-elle sur le carreau? *Journal Paysan Breton*. <https://www.paysan-breton.fr/2025/07/1-ferme-sur-3-restera-t-elle-sur-le-carreau/>
- PermaLab. (s. d.). *Formations – Permalab*. Consulté 18 septembre 2025, à l'adresse <https://permalab.fr/formations/>

- Pocock, M. J. O., Evans, D. M., & Memmott, J. (2010). The impact of farm management on species-specific leaf area index (LAI) : Farm-scale data and predictive models. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 135(4), 279-287. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.10.006>
- Refsgaard, J., Storm, B., & Clausen, T. (2010). Système Hydrologique Européen (SHE) : Review and perspectives after 30 years development in distributed physically-based hydrological modelling. *Hydrology Research*, 41(5), 355-377. <https://doi.org/10.2166/nh.2010.009>
- Richet, J.-B., Kervroëdan, L., Saunier, M., & Ouvry, J.-F. (2019). *La haie herbacée antiérosive*.
- Richet, J.-B., Ouvry, J.-F., & Saunier, M. (2017). The role of vegetative barriers such as fascines and dense shrub hedges in catchment management to reduce runoff and erosion effects : Experimental evidence of efficiency, and conditions of use. *Ecological Engineering*, 103, 455-469. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.08.008>
- Ridremont, F., Degré, A., & Claessens, H. (2012). *MIEUX COMPRENDRE ET ÉVALUER LA RÉSERVE EN EAU DES SOLS FORESTIERS*.
- Roth, B. (2022, novembre 21). *The Root Atlas Unearthed Intelligence*. DOP. <https://doorofperception.com/2022/11/wurzelatlas-root-system-illustrations/>
- Ruangpan, L., Vojinovic, Z., Di Sabatino, S., Leo, L. S., Capobianco, V., Oen, A. M. P., McClain, M. E., & Lopez-Gunn, E. (2020). Nature-based solutions for hydro-meteorological risk reduction : A state-of-the-art review of the research area. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(1), 243-270. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-243-2020>
- Ryszkowski, L., & Kędziora, A. (1993). Energy control of matter fluxes through land-water ecotones in an agricultural landscape. *Hydrobiologia*, 251(1), 239-248. <https://doi.org/10.1007/BF00007183>
- Selles, A., Herivaux, C., Le Coent, P., & Marechal, J.-C. (2023). Des solutions fondées sur la nature pour une gestion durable des eaux souterraines ? Une revue des effets hydrogéologiques. *Techniques Sciences Méthodes*, 71-101. <https://doi.org/10.36904/tsm/202309071>
- SPW. (s. d.). *Eco-régime maillage écologique (Nouveauté 2025)—Portail de l'agriculture wallonne*. Agriculture en Wallonie. Consulté 1 juin 2025, à l'adresse <https://agriculture.wallonie.be/home/aides/pac-2023-2027-description-des-interventions/eco-regimes-nouveaute-2025/eco-regime-maillage-ecologique-nouveaute-2025.html>
- SPW. (2018). *Reconnaissance de la sécheresse 2017 comme calamité agricole—Portail de l'agriculture wallonne*. Agriculture en Wallonie. <https://agriculture.wallonie.be/home/aides/aides-etat/reconnaissance-de-la-secheresse-2017-comme-calamite-agricole.html>
- SPW. (2020). *Reconnaissance de la sécheresse 2018 comme calamité agricole—Portail de l'agriculture wallonne*. Agriculture en Wallonie. <https://agriculture.wallonie.be/home/aides/aides-etat/reconnaissance-de-la-secheresse-2018-comme-calamite-agricole.html>
- SPW. (2022). *Érosion hydrique des sols—État de l'environnement wallon*. Etat de l'environnement wallon. <https://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicator sheets/SOLS 3.html>
- SPW. (2025, septembre 18). *Les pluies abondantes et persistantes survenues entre le 1er octobre 2023 et le 15 juin 2024 ont été reconnues comme calamité agricole—Portail de l'agriculture wallonne*. Agriculture en Wallonie. <https://agriculture.wallonie.be/home/communiqués/preses/les-pluies-abondantes-et-persistantes-survenues-entre-le-1er-octobre-2023-et-le-15-juin-2024-ont-ete-reconnues-comme-calamite-agricole.html>
- Szabó, B., Weynants, M., & Weber, T. K. D. (2021). Updated European hydraulic pedotransfer functions with communicated uncertainties in the predicted variables (euptfv2). *Geoscientific Model Development*, 14(1), 151-175. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-151-2021>
- UICN, F. (2018). *SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE – UICN-FR-COLLECTIVITES-BIODIVERSITE.FR*. <http://uicn-fr-collectivites-biodiversite.fr/solutions-fondees-sur-la-nature/>

- USDA. (2017). *Soil Survey Manual* (USDA Handbook 18). Government Printing Office. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/The-Soil-Survey-Manual.pdf>
- Valbiom. (2016). *Le miscanthus pour cultiver mes bandes tampons, j'y pense !* (No. 3; Les Carnets de ValBiom).
- Van Den Berge, S., Vangansbeke, P., Baeten, L., Vanneste, T., Vos, F., & Verheyen, K. (2021). Soil carbon of hedgerows and 'ghost' hedgerows. *Agroforestry Systems*, 95(6), 1087-1103. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00634-6>
- Van Genuchten. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils1. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Viaud, V., Durand, P., Merot, P., Sauboua, E., & Saadi, Z. (2005). Modeling the impact of the spatial structure of a hedge network on the hydrology of a small catchment in a temperate climate. *Agricultural Water Management*, 74(2), 135-163. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.11.010>
- Viaud, V., Grimaldi, C., & Mérot, P. (2009). Impact des haies sur la ressource en eau et en sol à partir de l'exemple de la Bretagne : Résultats récents et perspectives. *Revue forestière française*, 61(5), 493-502. <https://doi.org/10.4267/2042/31528>
- Viaud, V., & Thomas, Z. (2019). Une réflexion sur l'état des connaissances des fonctions du bocage pour l'eau dans une perspective de mobilisation pour l'action. *Sciences Eaux & Territoires*, 30(4), 32-37. <https://doi.org/10.3917/set.030.0032>
- Viel, V., Delahaye, D., & Reulier, R. (2014). Impact de l'organisation des structures paysagères sur les dynamiques de ruissellement de surface en domaine bocager. Etude comparée de 3 petits bassins versants bas-normands. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 20(2), Article 2. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.10619>
- Wallace, E. E., McShane, G., Tych, W., Kretschmar, A., McCann, T., & Chappell, N. A. (2021). The effect of hedgerow wild-margins on topsoil hydraulic properties, and overland-flow incidence, magnitude and water-quality. *Hydrological Processes*, 35(3), e14098. <https://doi.org/10.1002/hyp.14098>
- Walter, C., Merot, P., Layer, B., & Dutin, G. (2003). The effect of hedgerows on soil organic carbon storage in hillslopes. *Soil Use and Management*, 19(3), 201-207. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2003.tb00305.x>
- YesWePlant. (2024). *Vademecum—Plantation d'une haie vive, d'un taillis linéaire, d'un verger et d'un alignement d'arbres et entretien d'arbres têtards*. Région Wallonne. <https://www.natagriwal.be/wp-content/uploads/2024/11/A4-Vademecum-Plantations-FR-112024-v4.pdf>

8 ANNEXES

Annexe 1 : Référentiel national Français sur la typologie des haies (Afac-Agroforesteries, 2019)

Typologie des haies en France suivant les modalités de gestion pour un renouvellement des haies					 haute jete	 cèpe
Haie en devenir	1 ● haie réduite  p.17	2 ● haie de colonisation  p.17	3 ● jeune haie plantée (<20 ans)  p.18			
Taillis simple	4 ● cèpes d'arbustes  p.22	5 ● cèpes d'arbres  p.28	6 ● taillis foresté de hêtres  p.38			
Taillis mixte	7 ● cèpes d'arbres et d'arbustes taillés sur les trois faces  p.40	8 ● cèpes d'arbres et d'arbustes  p.46				
Futaie régulière	9 ● haute jete du même âge  p.50	10 ● alignement d'arbres émondés  p.62	11 ● alignement de têtards  p.68			
Futaie irrégulière	12 ● haute jete d'âges différents  p.76	13 ● haute jete avec têtards  p.80	14 ● haute jete avec arbres émondés  p.81			
Taillis sous futaie	15 ● haute jete avec cèpes d'arbustes taillés sur les trois faces  p.82	16 ● haute jete avec cèpes d'arbustes  p.86	17 ● haute jete avec cèpes d'arbres  p.92	18 ● haute jete avec cèpes d'arbres et d'arbustes  p.96		
	19 ● têtards avec cèpes d'arbustes taillés sur les trois faces  p.100	20 ● têtards et cèpes d'arbustes  p.102	21 ● têtards et cèpes d'arbres  p.104	22 ● haute jete avec têtards et cèpes d'arbres et d'arbustes  p.106	23 ● haute jete avec arbres émondés et cèpes d'arbres et d'arbustes  p.106	

Annexe 1 (suite)

Dénominations des types de haies				
données par les structures et par région				
Haie en devenir	1 ● haie résiduelle A. haie basse très discontinue B. relique G. haie arbustive dégradée p.17	2 ● haie de colonisation E. pousse spontanée p.17	3 ● jeune haie plantée (<30 ans) B. jeune haie, plantation D. arbres de plantation p.18	A. Occitanie B. Bretagne C. Normandie D. Haut-de-France E. Pays de la Loire F. Auvergne-Rhône-Alpes G. Centre-Val-de-Loire
	4 ● cépées d'arbustes A. haie basse buissonnante B. haie de taillis (cépées) d'arbustes C. haie arbustive D. haie basse libre F. haie basse/arbustive récoltable E. haie basse G. haie arbustive complète p.22	5 ● cépées d'arbres A. haie arbustive haute B. haie de taillis (cépées) d'arbres C. taillis simple D. haie haute arborescente G. haie de taillis E. haie monostrate arbustive p.28	6 ● taillis foresté de hêtres C. taillis foresté de hêtres p.38	
Taillis mixte	7 ● cépées d'arbres et d'arbustes taillés sur les trois faces C. haie buissonnante D. haie arbustive taillée F. haie basse (non récoltable) D. haie basse «taillée» G. haie arbustive tondue «au carré» p.40	8 ● cépées d'arbres et d'arbustes A. bouillage buissonnant et strate arbustive haute B. haie de taillis mixte d'arbres et d'arbustes C. taillis avec sous étage arbustif E. haie deux strates F. ripisylve G. ripisylve libre p.46		
	9 ● hauts jets du même âge A. alignement d'arbres de haut jet B. futaie régulière C. arbres de haut jet seuls F. alignement d'arbres spontanés E. alignement d'arbres (futaie) D. arbres de hauts jets p.50	10 ● alignement d'arbres émondés B. ragosses F. alignement de frênes émondés B. futaie de ragosses D. arbres émondés p.62	11 ● alignement de têtards C. têtards seuls D. haie alignement d'arbres têtards E. alignement de chênes têtards et disparition strates basses F. alignement d'arbres têtards E. haut-taillis D. arbres têtards p.68	
Futaie irrégulière	12 ● hauts jets d'âges différents B. futaie irrégulière D. ripisylve F. alignement d'arbres spontanés G. ripisylve futaie irrégulière p.76	13 ● hauts jets avec têtards C. haut jet avec têtards D. ripisylve F. alignement de têtards et d'arbres de croissance libre G. alignement arbres têtards et de hauts jets p.80	14 ● hauts jets avec arbres émondés B. futaie à ragosses p.81	
	15 ● hauts jets avec cépées d'arbustes taillés sur les trois faces D. haie basse ponctuée d'arbres D. haie basse arborée F. haie basse ponctuée d'arbres E. haie basse taillée avec quelques arbres D. haie basse avec arbres de hauts jets G. arbres sur strate basse tondue haie carrée avec arbres p.82	16 ● hauts jets avec cépées d'arbustes A. arbres de haut jet avec bouillage buissonnant C. arbres de haut jet avec sous-étage arbustif F. haie haute G. haie haute irrégulière p.86	17 ● hauts jets avec cépées d'arbres A. haie d'arbres de haut jet et d'arbres hauts C. haut jet avec taillis D. haie haute arborée D. taillis et hauts jets E. haie arborée D. haie haute avec arbres de hauts jets p.92	18 ● hauts jets avec cépées d'arbres et d'arbustes A. haie trois strates : arborescente, arbustive et buissonnante B. taillis sous futaie C. haie trois strates D. ripisylve E. haie trois strates E. haie pluristrate D. haie haute avec arbres de hauts jets G. haie haute complète p.96
19 ● têtards avec cépées d'arbustes taillés sur les trois faces E. alignement de chênes têtards et strate basse d'épines taillées en lisse D. haie basse avec arbres têtards p.100	20 ● têtards et cépées d'arbustes D. haie basse arborée (d'arbres têtards) E. alignement de chênes têtards et strate basse d'épines F. haie haute p.102	21 ● têtards et cépées d'arbres C. têtards avec sous étage arbustif D. haie alignement d'arbres têtards avec arbustes D. haie haute avec arbres têtards p.104	22 ● hauts jets avec têtards et cépées d'arbres et d'arbustes D. haie libre avec têtards p.106	23 ● hauts jets avec arbres émondés et cépées d'arbres et d'arbustes D. haie libre avec arbres émondés p.106

Liste des essences indigènes wallonnes

Espèces reprises dans l'annexe 2 de l'AGW "mesures générales".

Le fichier écologique des essences est un outil d'aide à la décision pour déterminer l'adéquation essence/station au service des gestionnaires d'espaces forestiers et naturels: n'hésitez pas à consulter le site www.fichierologique.be.

Alisier torminal <i>Sorbus torminalis</i>	Néflier <i>Mespilus germanicus</i>
Alouchier <i>Sorbus aria</i>	Nerprun purgatif <i>Rhamnus cathartica</i>
Aubépine épineuse <i>Crataegus laevigata</i>	Noisetier, coudrier <i>Coryllus avellana</i>
Aubépine monogyne <i>Crataegus monogyna</i>	Orme champêtre <i>Ulmus minor</i>
Aulne glutineux <i>Alnus glutinosa</i>	Orme des montagnes <i>Ulmus glabra</i>
Bouleau pubescent <i>Betula pubescens</i>	Orme lisse <i>Ulmus laevis</i>
Bouleau verruqueux <i>Betula pendula</i>	Peuplier noir <i>Populus nigra</i>
Bourdaine <i>Frangula alnus</i>	Peuplier tremble <i>Populus tremula</i>
Buis <i>Buxus sempervirens</i>	Poirier commun <i>Pyrus pyraster</i>
Camérisier <i>Lonicera xylosteum</i>	Pommier sauvage <i>Malus sylvestris</i>
Cerisier à grappes <i>Prunus padus</i>	Prunellier <i>Prunus spinosa</i>
Cerisier de Ste-Lucie <i>Prunus maaleb</i>	Saule à oreillettes <i>Salix aurita</i>
Charme <i>Carpinus betulus</i>	Saule à trois étamines <i>Salix triandra</i>
Chêne pédonculé <i>Quercus robur</i>	Saule blanc <i>Salix alba</i>
Chêne pubescent <i>Quercus pubescens</i>	Saule cassant <i>Salix fragilis</i>
Chêne sessile <i>Quercus petraea</i>	Saule cendré <i>Salix cinerea</i>
Cornouiller mâle <i>Cornus mas</i>	Saule des vanniers <i>Salix viminalis</i>
Cornouiller sanguin <i>Cornus sanguinea</i>	Saule marsault <i>Salix caprea</i>
Épine-vinette <i>Berberis vulgaris</i>	Saule pourpre <i>Salix purpurea</i>
Érable champêtre <i>Acer campestre</i>	Saule roux <i>Salix atrocinerea</i>
Érable plane <i>Acer platanoides</i>	Sorbier des oiseleurs <i>Sorbus aucuparia</i>
Érable sycomore <i>Acer pseudoplatanus</i>	Sureau à grappes <i>Sambucus racemosa</i>
Frêne commun <i>Fraxinus excelsior</i>	Sureau noir <i>Sambucus nigra</i>
Fusain d'Europe <i>Euonymus europaeus</i>	Tilleul à grandes feuilles <i>Tilia platyphyllos</i>
Genévrier commun <i>Juniperus communis</i>	Tilleul à petites feuilles <i>Tilia cordata</i>
Hêtre <i>Fagus sylvatica</i>	Troène <i>Ligustrum vulgare</i>
Houx <i>Ilex aquifolium</i>	Viorne mancienne <i>Viburnum lantana</i>
If commun <i>Taxus baccata</i>	Viorne obier <i>Viburnum opulus</i>
Merisier <i>Prunus avium</i>	



DES SUBVENTIONS À LA PLANTATION ET À L'ENTRETIEN

Vous souhaitez aménager vos terrains avec des arbres, des haies ou des fruitiers ?
Découvrez le régime de subventions octroyées par la Wallonie, ainsi que les nombreux bénéfices liés à ces éléments du paysage.

POUR QUI ?
Tout propriétaire, commune, établissement scolaire (public ou privé) ou gestionnaire ayant l'accord écrit du propriétaire.

OÙ ?
Les plantations sont subsidiées partout en Wallonie sauf en zone forestière.

COMMENT ?
La demande de subvention doit être introduite à la Direction de la Nature et des Espaces verts via un formulaire disponible en ligne sur le portail de la biodiversité : http://biodiversite.wallonie.be/rubrique_Agrir_onglet_Subventions_a_la_plantation.

QUAND DEMANDER LES SUBVENTIONS ?
Le demandeur introduit sa demande de subvention après avoir effectué la plantation. Nous lui conseillons néanmoins de faire une demande d'avis préalable avant de planter.

À QUELLES CONDITIONS PRINCIPALES ?

- Le demandeur s'engage à maintenir et entretenir la plantation pendant 30 ans. Il installera, si nécessaire, une protection contre la faune sauvage ou le bétail.
- Aucune taille ne sera effectuée entre le 1^{er} avril et le 31 juillet.
- L'épandage de fertilisant minéral et de traitement phytopharmaceutique à moins d'un mètre du pied est interdit, y compris lors des travaux préparatoires.



LES HAIES ET LES TAILLIS LINÉAIRES

Ces éléments de végétation offrent de nombreux avantages : ils délimitent le terrain, structurent ou embellissent le paysage et favorisent la biodiversité. Haies et taillis protègent par ailleurs les sols de l'érosion tout en produisant du bois. Ce sont des composants essentiels d'un maillage écologique qu'il est important de recréer ou de maintenir dans les campagnes.

CONDITIONS PRINCIPALES POUR BÉNÉFICIER DES SUBVENTIONS À LA PLANTATION

POUR LES HAIES

- Plantation de minimum 100 m (en tronçons de minimum 20 m) sauf en zone d'habitat ou d'habitat à caractère rural où la plantation est de minimum 20 m
- 3 espèces minimum dont aucune ne représente plus de 50% des plants

POUR LES TAILLIS LINÉAIRES

- Plantation de minimum 100 m en tronçons de 50 m minimum
- Maximum 2 m entre les plants dans un rang et maximum 3 m entre les rangs
- Intervalle de taille de minimum 2 ans

POUR LES HAIES

- Maximum 70 cm entre chaque plant dans un rang
- De 70 à 150 cm entre les rangs
- Au moins 2/3 de plants entomophiles (pollinisés par les insectes) (voir l'annexe 1 du Vademecum)

QUEL SOUTIEN FINANCIER ?

SUBVENTIONS A LA PLANTATION

Verger hautes-tiges

- 25 €/ arbre (voir l'annexe 2 du Vademecum)

Alignement d'arbres et arbres têtards en pépinière

- 6 €/ arbre acheté
- 2 €/ bouture de saule

Haie vive

- 5 €/ m (mono rang)
- 7 €/ m (double rang)
- 9 €/ m (triple rang et plus)

Taillis linéaire

- 1,50 €/ m (mono rang)
- 3 €/ m (double rang)
- 4 €/ m (triple rang et plus)

SUBVENTIONS A L'ENTRETIEN

Arbre têtard

- 20 €/ arbre

* Les travaux sont multiplés par 1,5 lorsque les travaux sont réalisés sur une ententeur agricole sans déviation 80% du montant total de la facture. L'ensemble des travaux et fournitures nécessaires à la création de taillis et haies (fertilisants, produits phytosanitaires, protection contre le bétail, etc.) sont éligibles. Régimes définis dans l'annexe au document « Montants et Débits Minimaux d'Interventions multiplés par 1,500 et 1,500 du 31/08/2024 ».

BON À SAVOIR

PETIT PLUS

Pourquoi ne pas en profiter pour créer un point de repère à l'entrée d'une propriété en plantant une haie qui soulignera le chemin d'accès avec quelques grands arbres pour donner du relief?

Pour accueillir davantage la biodiversité, privilégier des essences favorisant les insectes butineurs ou des arbres et arbustes avec des fruits pour les oiseaux.



2

LES VERGERS HAUTES-TIGES

Les vergers font partie d'un patrimoine rural très apprécié. Ils permettent une diversification de la production et offrent des produits à valoriser à travers les circuits courts ou des artisans locaux. Ils constituent également un refuge pour la faune sauvage, en particulier lorsqu'ils sont composés de fruitiers hautes-tiges.

CONDITIONS PRINCIPALES POUR BÉNÉFICIER DES SUBVENTIONS À LA PLANTATION

- Minimum 15 arbres hautes-tiges maintenus par un tuteur
- Hauteur de tronc de minimum 180 cm sous la couronne
- Au moins 75% des arbres sont des variétés figurant dans la liste établie par le Ministre (voir l'annexe 2 du Vademecum)
- Écartement entre les arbres de 8 m minimum et 40 m maximum
- Entretien 1 fois tous les 10 ans
- Minimum 5 variétés par plantation et aucune ne représente plus de 40% du nombre d'arbres (voir l'annexe 2 du Vademecum)

PETIT PLUS

Vous cherchez des informations sur les différentes variétés de fruitiers ? Consultez le site internet du projet Biodimestia (www.biodimestia.eu). Vous y trouverez des infos très utiles et des conseils techniques de plantation.



3

LES ALIGNEMENTS ET LES ARBRES TÊTARDS

Un alignement de saules têtards en bord de cours d'eau ou une rangée d'arbres le long d'une drève sont autant d'éléments, plantés par nos aïeux, qui façonnent le paysage. Conservons et replantons ces repères visuels, ces sources de bois local ou encore ces refuges de biodiversité!

CONDITIONS PRINCIPALES POUR BÉNÉFICIER DES SUBVENTIONS À LA PLANTATION

- Arbres de minimum 120 cm de haut maintenus par un tuteur
- Minimum 20 arbres (avec des tronçons de 10 arbres minimum)
- Densité de 100 arbres maximum à l'hectare
- Minimum 8 m et maximum 15 m entre les arbres

PETIT PLUS

Pour conserver les arbres anciens, n'oubliez pas que ce régime de subvention prévoit également un soutien à l'entretien des arbres têtards de plus de 30 ans n'ayant plus été entretenus depuis 10 ans (par 10 pieds minimum).

BON À SAVOIR

Les arbres têtards sont souvent des saules, dont il existe une multitude d'espèces et d'hybrides. Le saule blanc (*Salix alba*), le saule fragile (*Salix fragilis*) et le saule hybride (*Salix alba x fragilis*) sont les plus fréquemment taillés en têtard. Il est également possible de conduire en têtard d'autres espèces telles que le charme, le hêtre, le frêne et même certains chênes (voir l'annexe 3 du Vademecum).

BON À SAVOIR

En plus des fruits de table et des jus, il existe d'autres débouchés pour votre vergier, tels que le cidre, le sirop à tartiner, les pâtes de fruits et bien d'autres possibilités de valorisation. Des initiatives existent afin d'épauler, rassembler et mettre en contact les acteurs du secteur (producteurs et transformateurs): Diversifruits (www.diversifruits.be), Localifruits (www.localifruits.be) et Diversiferm (www.diversiferm.be).

